

Titre: Méthodologie d'évaluation de la demande de chaleur des groupes de bâtiments dans le cadre d'une étude de faisabilité du chauffage urbain
Title:

Auteur: Olivier Quirion-Blais
Author:

Date: 2010

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Quirion-Blais, O. (2010). Méthodologie d'évaluation de la demande de chaleur des groupes de bâtiments dans le cadre d'une étude de faisabilité du chauffage urbain [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie.
Citation: <https://publications.polymtl.ca/397/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/397/>
PolyPublie URL:

Directeurs de recherche: Martin Trépanier, & Jean Paris
Advisors:

Programme: Génie Industriel
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

Méthodologie d'évaluation de la demande de chaleur des groupes de bâtiments
dans le cadre d'une étude de faisabilité du chauffage urbain

OLIVIER QUIRION-BLAIS

DÉPARTEMENT DE MATHÉMATIQUES ET GÉNIE INDUSTRIEL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE INDUSTRIEL)

AOÛT, 2010

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé:

MÉTHODOLOGIE D'ÉVALUATION DE LA DEMANDE DE CHALEUR DES GROUPES
DE BÂTIMENTS DANS LE CADRE D'UNE ÉTUDE DE FAISABILITÉ DU CHAUFFAGE
URBAIN

Présenté par :QUIRION-BLAIS, Olivier

en vue de l'obtention du diplôme de : MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. AGARD Bruno, Ph. D., président

M. TRÉPANIÉ Martin, ing. Ph. D., membre et directeur de recherche

M. PARIS Jean, Ph. D., membre et codirecteur de recherche

M. KUMMERT Michaël, Ph. D., membre

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier tous ceux qui m'ont aidé à réaliser ce travail à commencer par Martin et Jean qui m'ont supervisé et relu si souvent. Je voudrais aussi remercier Irene et Pidenam qui ont exécuté une part considérable des calculs. Finalement, je remercie aussi toute l'équipe du laboratoire pour leurs encouragements.

RÉSUMÉ

Dans le cadre d'études d'amélioration de l'efficacité énergétique d'usines de pâte et papier, des modifications apportées au procédé de transformation permettent de libérer de grandes quantités de vapeur de qualité inférieure. Ce type de vapeur, ayant une basse pression et température, se retrouve généralement en surplus dans les usines. La création de grappes éco-industrielles permettrait de tisser des liens avec la communauté et d'autres entreprises afin de revaloriser cette vapeur. Une avenue intéressante serait l'aménagement de réseaux de chauffage urbain. Cette technologie consiste à distribuer la chaleur sous forme d'eau chaude ou de vapeur, dans des canalisations généralement sous-terraines, d'une ou de plusieurs chaudières centrales, à une série de clients étendus sur un territoire plus ou moins grand. L'énergie distribuée sert principalement à chauffer les bâtiments, cependant, elle peut aussi être utilisée pour l'eau chaude sanitaire ou pour des électroménagers adaptés.

Sous certaines conditions, ce type de chauffage s'avère rentable et respectueux de l'environnement pour plusieurs raisons dont l'efficacité supérieure et la diminution des émissions polluantes d'une chaudière centrale dû au meilleur contrôle de la combustion ainsi que la possibilité d'adapter les équipements à l'utilisation de ressources locales comme la biomasse près des usines de pâte et papier. Cependant, pour que les promesses d'économie se réalisent, la demande de chaleur des clients doit être suffisamment élevée et concentrée. Des études de faisabilité détaillées doivent être réalisées pour justifier les importants investissements nécessaires. De telles études exigent beaucoup de temps sans compter qu'elles requièrent de nombreuses données qui peuvent être difficiles à acquérir.

L'objectif de ce travail consiste donc à développer une méthodologie qui permet de réaliser une étude de faisabilité préliminaire, rapidement et en utilisant des données aisément accessibles. Celle-ci se concentre principalement sur l'aspect consommation de chaleur de la part des clients, qui est un point particulièrement critique quant à la décision d'implanter ou non un réseau de chaleur. L'accent est d'abord porté sur les édifices résidentiels, mais une méthode est aussi développée pour tenir compte de la demande des bâtiments commerciaux et institutionnels.

Une certaine redondance entre les valeurs fournies par les sources de données a permis de développer quatre procédures de calculs qui procurent la consommation pour le secteur résidentiel :

- Le calcul C1 est le plus long à réaliser. C'est également le calcul qui utilise le plus de données spécifiques au cas étudié : photos aériennes, données de recensement de la zone étudiée (type de bâtiment (maisons unifamiliales, jumelés, appartements, maisons mobiles) et années de construction) et vérifications sur place. Des estimations à l'échelle nationale des valeurs des besoins thermiques sont aussi utilisées.
- Le calcul C2 est moins spécifique que C1, mais nécessite beaucoup moins de temps de calculs. Les sources de données locales utilisées pour ce calcul sont : photo aériennes et données de recensement de la zone étudiée. Tandis que celles nationales sont : estimation des aires des habitations et valeurs des besoins thermiques.
- Les calculs C3 et C4 sont très similaires. Ce sont aussi les calculs les plus faciles à réaliser, C4 ayant un léger avantage sur ce plan. Les données spécifiques à la zone étudiée dans les deux cas sont les données de recensement tandis que C3 utilise des estimations de l'aire des bâtiments et de la valeur des besoins thermiques des bâtiments à l'échelle nationale. C4 utilise seulement des valeurs de demande thermique des bâtiments, différentes de celles de C3. Une analyse des résultats a permis de constater que ces deux calculs donnaient le même résultat c'est pourquoi C3 a été éliminé pour l'analyse des résultats.

L'utilisation de trois procédures assure la stabilité de la méthode lorsque les résultats obtenus sont du même ordre de grandeur. Une moyenne des trois résultats permet donc d'obtenir une valeur de consommation fiable.

Cette méthodologie a ensuite été appliquée à quatre cas. Un de ceux-ci a déjà fait l'objet d'une étude de faisabilité détaillée concernant l'implantation d'un réseau de chauffage urbain ce qui permet de valider les résultats obtenus avec la nouvelle méthodologie. Les trois autres cas servent plutôt à l'étudier dans diverses conditions (nombre, densité, type et année de construction des bâtiments). Les résultats de la validation ont permis de confirmer que la méthodologie peut déterminer la consommation de chaleur à plus ou moins 20% de la valeur de référence. Elle permet aussi d'obtenir la surface totale utile des bâtiments avec un écart de 5%. Les trois autres études de cas, A, B et C, ont confirmé la possibilité d'appliquer la méthodologie dans diverses conditions. Le cas A a démontré une meilleure stabilité des résultats lorsque le taux de maisons unifamiliales est moins élevé. Puisque ce taux est plus élevé dans le cas de validation, on peut

présumer une meilleure prédiction de la consommation dans ce cas. Les écarts entre les résultats totaux obtenus avec les quatre procédures de calculs du cas B sont particulièrement petits avec un écart d'au maximum 5%. Cependant, une analyse des aires de diffusion individuelles a montré de plus grands écarts positifs et négatifs que dans le cas A, ceux-ci s'annulant pour donner un très bon résultat moyen. Cette situation est expliquée par le fait que les appartements de cette ville sont en général plus grands que la moyenne nationale ce qui cause une certaine erreur. Le cas C a présenté une difficulté supplémentaire étant donné que la photo aérienne n'était pas disponible. Il a tout de même été possible de réaliser deux des procédures de calculs, C3 et C4, ce qui a permis d'obtenir une idée de la consommation pour ce cas.

Pour le secteur commercial, une méthodologie semblable à celle du secteur résidentielle est développée. Cependant, le manque de données globales a imposé l'utilisation d'une procédure au cas par cas. Cette façon de faire peut cependant être justifiée en considérant que les immeubles commerciaux et institutionnels sont moins nombreux et ont une consommation plus importante. Étant donné la durée prolongée de l'application de ce type d'approche, seulement deux des cas mentionnés plus haut ont été réalisés. Le cas de validation a d'abord confirmé, avec un écart de 7% par rapport à la consommation de référence, les meilleurs résultats obtenus que pour le secteur résidentiel. Il a aussi permis de cibler les zones où la demande de chaleur est plus importante. Puis, il a permis d'estimer que la demande commerciale et institutionnelle compte pour 10% à 40% de la demande totale.

L'intégration des résultats obtenus par les méthodologies à une étude de faisabilité de chauffage urbain est ensuite discutée. Une analyse conjointe de la consommation résidentielle ainsi que commerciale et institutionnelle permet de juger l'importance de ces deux secteurs pour la planification d'un réseau de chaleur. La rentabilité des cas analysés est finalement étudiée en relation avec les seuils de demande thermique proposés dans la littérature.

ABSTRACT

In the context of energy efficiency improvements to pulp and paper mills, process modifications allow to free low quality steam. This kind of low pressure and temperature steam is often found to be in excess in mills. New opportunities to use this energy could be created by gathering plants along with local communities and other enterprises into eco-industrial clusters. Following this proposition, district heating is an interesting technology that could be developed. It consists in supplying buildings with steam or hot water from one or more central heating plants through a series of canalization, generally underground. The supplied energy is used mostly for space heating but it can also be used with appliances specially designed for this purpose.

Under certain conditions, this type of heating is cheaper and more environmentally friendly for several reasons including the facts that one central boiler plant is more efficient and has lower pollutant emissions due to better combustion control. Moreover, it can be adapted to multiple fuels that are locally available such as biomass around some pulp and paper mills. However, to insure that the savings occur, the heat demand must be sufficiently high and concentrated. Therefore, detailed feasibility studies shall be conducted to justify significant investments. Such studies require a lot of time not to mention that they necessitate a lot of data which can be difficult to obtain.

The objective of this work is to develop a methodology that can assess the feasibility of district heating quickly and using easily accessible data. It was mainly designed to determine the heat consumption, which is especially critical as to decide whether or not to implement this technology. The focus is primarily directed on residential buildings, but another methodology is also developed to take into account the commercial and institutional buildings demand.

An analysis of the sources of data revealed a certain redundancy among them. Therefore, four different computation procedures were developed to obtain the heat consumption of residential buildings:

- C1, the first procedure, is the most time consuming one. It is also the one that uses the most specific information from the case: aerial photographs, census data (building year of construction and type (single family detached, single family attached, apartments or

mobile homes)) and punctual on-site verification from the target area. National estimates of thermal requirements values are also used.

- C2, the second procedure, is less specific than C1, but is much less time consuming to achieve. The local data sources used are: aerial photographs and census data from the case. While the national ones are: estimates of the building heating surfaces and thermal requirements.
- C3 and C4, are the easiest procedures. Those two are very similar. The specific data used in these cases are census data from the locations under study. National data used for C3 are building surface estimates and thermal requirements values while C4 only uses thermal requirement values which are slightly different from those of C3. A further analysis revealed later that these two calculations yielded the same results. Therefore, since C3 is slightly more complicated to implement, it was removed from further analysis.

Using three procedures thus ensures the stability of the methodology when the three results are the same order of magnitude. An average of the three results gives a good estimation of the consumption.

The methodology was then applied to four study cases. One of them has already been the subject of a detailed district heating assessment feasibility study. It is used to validate the results obtained with the new methodology. The three other cases are rather used to test different conditions (number, density, type and year of construction of buildings). The validation results showed that the methodology can determine the heat consumption to about 20% of the baseline value. It also determines the total heating surface to about 5%. The three other study cases, A, B and C, have confirmed that possibility of applying the methodology in various conditions. Case A showed lower gaps between the four procedures when the rate of single family houses is lower. Since this rate is high in the validation case, better results can be expected for cases where the number of single family houses is low, such as in case A. In case B, the global results showed a particularly low gap between the four procedures with a maximum of 5%. However, an analysis of individual dissemination areas showed higher positive and negative gaps, which, when they are summed, compensate for the individual errors. The bigger errors in this case are explained by the fact that the apartments in this city are larger than the national average. Case C presented an additional

challenge since no aerial photo was available. It has nevertheless been possible to realize two calculation procedures, C3 and C4, which provided a broad approximation of the consumption.

For the commercial sector, a similar methodology to that of the residential sector is developed. However, the lack of global data has prescribed the individual processing of every building. This approach is also justified by the fact that commercial and institutional buildings are less numerous and have higher consumption. Due to the extended duration of this type of approach, only the validation and case A are realized. The first one confirmed the better results than the ones from the residential sector with a gap of 7% compared to the consumption baseline. The results from case A showed the areas where the heat consumption is higher. Furthermore, it showed that the commercial and institutional demand accounts for 10% to 40% of the total heat demand.

The integration of the results obtained into a district heating feasibility study is then discussed. A joint analysis of the residential and the commercial and institutional sectors showed the importance of considering each building's heat consumption for the planning of a district heating network. The profitability of the study cases is considered in relation to the thermal thresholds suggested in the literature.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	III
RÉSUMÉ.....	IV
ABSTRACT	VII
TABLE DES MATIÈRES	X
LISTE DES TABLEAUX.....	XIII
LISTE DES FIGURES.....	XV
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	XVII
LISTE DES ANNEXES.....	XVIII
CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	1
1.1 Mise en contexte.....	1
1.1.1 Les pâtes et papiers au Canada.....	1
1.1.2 Les grappes éco-industrielles	2
1.2 Problématiques et objectifs	3
1.3 Plan de travail.....	4
1.4 Organisation du mémoire	7
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE	9
2.1 Description des réseaux de chauffage urbain.....	9
2.1.1 La production de chaleur.....	10
2.1.2 La distribution de la chaleur.....	11
2.1.3 L'utilisation de la chaleur.....	14
2.1.4 L'histoire du chauffage urbain	18
2.1.5 Les réseaux à faible densité de demande thermique	21
2.1.6 Les réseaux alimentés par des usines	25

2.1.7	Les principales associations	25
2.1.8	Les études de faisabilité	26
2.2	Les méthodes d'évaluation de la demande de chaleur	29
2.2.1	Les méthodes d'ingénierie traditionnelles.....	29
2.2.2	Les modèles d'évaluation de charge thermique des groupes de bâtiments	29
2.3	Conclusion.....	30
CHAPITRE 3 CHARGE THERMIQUE DES ÉDIFICES RÉSIDENTIELS		31
3.1	Méthodologie	31
3.1.1	Données requises.....	31
3.1.2	Identification des variables.....	33
3.1.3	Calculs et manipulations	34
3.2	Études de cas	37
3.2.1	Sources de données	42
3.2.2	Outils	43
3.2.3	Résultats de la comparaison avec le cas de référence	44
3.2.4	Résultats de la mise en œuvre	48
CHAPITRE 4 CHARGE THERMIQUE DES ÉDIFICES COMMERCIAUX ET INSTITUTIONNELS.....		57
4.1	Méthodologie	57
4.1.1	Calculs et manipulations	58
4.2	Études de cas	58
4.2.1	Sources de données	58
4.2.2	Résultats et discussions	59
CHAPITRE 5 DISCUSSION GÉNÉRALE		63
5.1	Sources d'erreurs	63

5.2	Analyse conjointe de la consommation des bâtiments résidentiels, commerciaux et institutionnels	64
5.3	Seuils de rentabilité	66
5.4	Retour sur les études de faisabilité.....	68
CHAPITRE 6 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS		70
6.1	Contributions	70
6.2	Choix d'une méthode d'évaluation de la demande de chaleur.....	72
6.3	Perspectives de recherche.....	73
BIBLIOGRAPHIE		75
ANNEXES		83

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Estimation des investissements requis pour la conversion au chauffage urbain d'un édifice existant (Alao, 2007)	15
Tableau 2 : Densités favorisant l'implantation du chauffage urbain (Yildirim et al., 2006; Karlsson, 1982).	17
Tableau 3 : Seuils de rentabilité (énergie) pour l'installation de chauffage urbain.	17
Tableau 4 : Seuils de rentabilité (puissance) pour l'installation de chauffage urbain.	17
Tableau 5 : Pourcentages de bâtiments utilisant le chauffage urbain dans plusieurs pays européens et au Canada. Tiré de (Froning, 2003), sauf mention contraire.	21
Tableau 6 : Diverses statistiques à propos des études de cas.	42
Tableau 7 : Distribution des années de construction des bâtiments pour les études de cas (en %).	42
Tableau 8 : Valeurs des variables pour le cas de référence, procédure C1.	44
Tableau 9 : Valeurs des variables pour le cas de référence, procédure C2.	44
Tableau 10 : Valeurs des variables pour le cas de référence, procédure C3.	45
Tableau 11 : Valeurs des variables pour le cas de référence, procédure C4.	45
Tableau 12 : Valeurs des variables pour le cas A, procédure C1.	48
Tableau 13 : Valeurs des variables pour le cas A, procédure C2.	48
Tableau 14 : Valeurs des variables pour le cas A, procédure C3.	48
Tableau 15 : Valeurs des variables pour le cas A, procédure C4.	49
Tableau 16 : Valeurs des variables pour le cas B, procédure C1.	49
Tableau 17 : Valeurs des variables pour le cas B, procédure C2.	49
Tableau 18 : Valeurs des variables pour le cas B, procédure C3.	50
Tableau 19 : Valeurs des variables pour le cas B, procédure C4.	50
Tableau 20 : Valeurs des variables pour le cas C, procédure C3.	50
Tableau 21 : Valeurs des variables pour le cas C, procédure C4.	51

Tableau 22 : Moyenne de consommation par aire de diffusion obtenue avec C3 et C4.....	56
Tableau 23 : Densité de consommation pour les cas étudiés.	67
Tableau 24 : Aires moyennes pour les différents cas.....	73
Tableau 25 : Valeurs des besoins thermiques de chauffage pour les cas de validation et A.	83
Tableau 26 : Valeurs des besoins thermiques par ménage pour les cas de validation et A.	83
Tableau 27 : Valeurs des besoins thermiques par surface de chauffage pour le cas B.	84
Tableau 28 : Valeurs des besoins thermiques par ménage pour le cas B.....	84
Tableau 29 : Valeurs des besoins thermiques par surface de chauffage pour le cas C.	85
Tableau 30 : Valeurs des besoins thermiques par ménage pour le cas C.....	85
Tableau 31 : Valeur des besoins thermiques pour les bâtiments commerciaux et institutionnels .	86

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Grappe éco-industrielle potentielle autour d'une usine de pâte Kraft.....	3
Figure 2 : Représentation schématique du plan de travail	5
Figure 3 : Positionnement des différentes études de cas parmi les usines papetières au Canada. ...	7
Figure 4 : Exemple de configuration linéaire.....	12
Figure 5 : Exemple de configuration cyclique.	12
Figure 6 : Schéma des principales étapes d'une étude de faisabilité de l'implantation d'un réseau de chauffage urbain.	28
Figure 7 : Diagramme de la méthode proposée.....	33
Figure 8 : Aires de diffusions pour le cas de validation.....	40
Figure 9 : Aires de diffusion pour le cas A.	40
Figure 10 : Aires de diffusion pour le cas B.	41
Figure 11 : Aires de diffusion pour le cas C.	41
Figure 12 : Consommation de chaleur pour le cas de validation.	46
Figure 13 : Surface totale des immeubles pour le cas de validation.	47
Figure 14 : Comparaison entre les années de construction selon le recensement et selon le rôle d'évaluation municipal.....	47
Figure 15 : Consommations obtenues pour le cas A.....	51
Figure 16 : Consommations obtenues pour le cas B.	52
Figure 17 : Consommations obtenues pour le cas C.	52
Figure 18 : Pourcentages de différence entre C1 et C4 du cas A.....	54
Figure 19 : Pourcentages de différence entre C2 et C4 dans le cas A.....	54
Figure 20 : Pourcentages de différence entre C1 et C4 du cas B.	55
Figure 21 : Pourcentages de différence entre C2 et C4 du cas B.	55

Figure 22 : Consommation des bâtiments commerciaux et institutionnels pour le cas de validation.....	60
Figure 23 : Aire totale des bâtiments commerciaux et institutionnels pour le cas de validation. ..	60
Figure 24 : Consommation des bâtiments commerciaux et institutionnels du cas A.....	61
Figure 25 : Rapport de la consommation commerciale et institutionnelle sur la consommation totale.....	62
Figure 26 : Consommations de chaleur totales calculées par différentes procédures pour le cas de validation.....	65
Figure 27 : Consommation des bâtiments pour le cas A.....	66
Figure 28 : Densité de consommation par aire de diffusion pour le cas A.	68
Figure 29 : Densité de consommation par aire de diffusion pour le cas B.	68

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

ASHRAE	American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers
CDEA	Canadian District Energy Association
CREPUQ	Conférence des recteurs et des principaux des universités du Québec
GES	Gaz à effet de serre.
IDD	Initiative de démocratisation des données
IDEA	International District Energy Association
RNCan	Ressources Naturelles Canada.
SCIAN	Systèmes de classification des industries de l'Amérique du Nord
SIG	Système d'information géographique

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1 : Valeurs des besoins thermiques des bâtiments résidentiels.....	101
Annexe 2 : Valeurs des besoins thermiques des bâtiments commerciaux et institutionnels.....	104

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

Cette section du mémoire permet, dans un premier temps, de comprendre le contexte global de ce travail. Les objectifs en relation avec la problématique sont ensuite ciblés avec précision. Puis, les différentes étapes parcourues pour atteindre ce but sont exposées.

1.1 Mise en contexte

Ce travail s'inscrit dans le cadre d'un projet portant sur l'amélioration du profil énergétique des usines de pâte et papier au Canada ainsi que leur intégration à l'intérieur de grappes éco-industrielles. L'objectif est de développer une méthode facilitant la détermination de la demande de chaleur dans le cadre d'une étude de faisabilité du chauffage urbain afin de le faire valoir comme une alternative pour l'utilisation de la chaleur de basse qualité en surplus dans les usines. Cette première section soulève donc quelques faits saillants à propos de chacun des deux grands thèmes : les pâtes et papiers et les grappes éco-industrielles, pour en montrer l'importance.

1.1.1 Les pâtes et papiers au Canada

Au Canada, environ 39 000 employés travaillaient dans le groupe industriel des « Usines de pâte à papier, de papier et de carton » du classement du SCIAN en 2008 (Industrie Canada, 2010). Puisque ces usines s'établissent généralement près de la ressource, dans les régions éloignées, elles constituent un enjeu économique prédominant et un employeur majeur pour les localités dans lesquelles elles se situent. Présentement, les usines papetières canadiennes font face à une crise majeure due à l'arrivée de nouveaux concurrents et à une chute des prix de vente des produits. Cette situation les pousse à faire preuve d'ouverture face aux nouvelles idées qui pourraient les aider comme l'implantation de grappe éco-industrielles.

Du point de vue énergétique, l'industrie des pâtes et papiers offre un potentiel d'énergie verte très intéressant. Environ 125 usines papetières (Pulp & Paper Canada, 2009) consomment un peu plus du quart de l'énergie consommée par toutes les industries combinées au Canada (Ressources Naturelles Canada, 2009b). Cette industrie peut, d'autre part, se vanter d'avoir la plus faible intensité d'émission de GES (gaz à effet de serre) parmi toutes les industries canadiennes, soit 7,4 tonnes/TJ, comparativement à une moyenne de 49,4 tonnes/TJ (Ressources Naturelles Canada, 2009b).

1.1.2 Les grappes éco-industrielles

Les grappes éco-industrielles sont définies comme des regroupements de plusieurs organisations physiquement rapprochés qui mettent leurs ressources en commun dans le but d'améliorer les bénéfices environnementaux et économiques (Anbumozhi, V., 2007). Afin de viser une meilleure efficacité énergétique elles permettraient, entre autre, aux usines papetières de récupérer une partie de leur chaleur pour la redistribuer à d'autres utilisateurs dans les environs. La figure 1 présente un exemple d'une grappe éco-industrielle autour d'une usine de pâte Kraft qui comprend l'intégration des éléments suivants :

1. Une unité de gazéification exploite des résidus de biomasse forestière ainsi que l'énergie de l'usine pour produire un gaz combustible, le syngas, utilisable par l'usine de pâte Kraft ainsi que l'usine de bioraffinage;
2. Une unité de bioraffinage utilise la chaleur de l'usine de pâte Kraft pour transformer le syngas et des déchets biodégradables en un combustible commercialisable qui peut être vendu ou utilisé par l'usine de pâte Kraft et l'unité de gazéification;
3. Parmi 181 usines papetières, 58% possèdent déjà une unité de cogénération pour produire de l'électricité à partir de la vapeur à haute pression. Ce pourcentage monte à 75% dans le cas du procédé de pâte Kraft (Neill and Gunter Limited, 1999);
4. Une unité de chauffage urbain permet de récupérer la chaleur de basse qualité. La température et la pression de celle-ci ne sont pas assez élevées pour qu'elle puisse être utilisée dans l'usine. Elle serait donc vendue pour subvenir aux besoins énergétiques des entreprises environnantes ainsi que pour chauffer les immeubles du village;
5. La ville apporte son support en fournissant ses déchets biodégradables pour alimenter l'usine de bioraffinage.

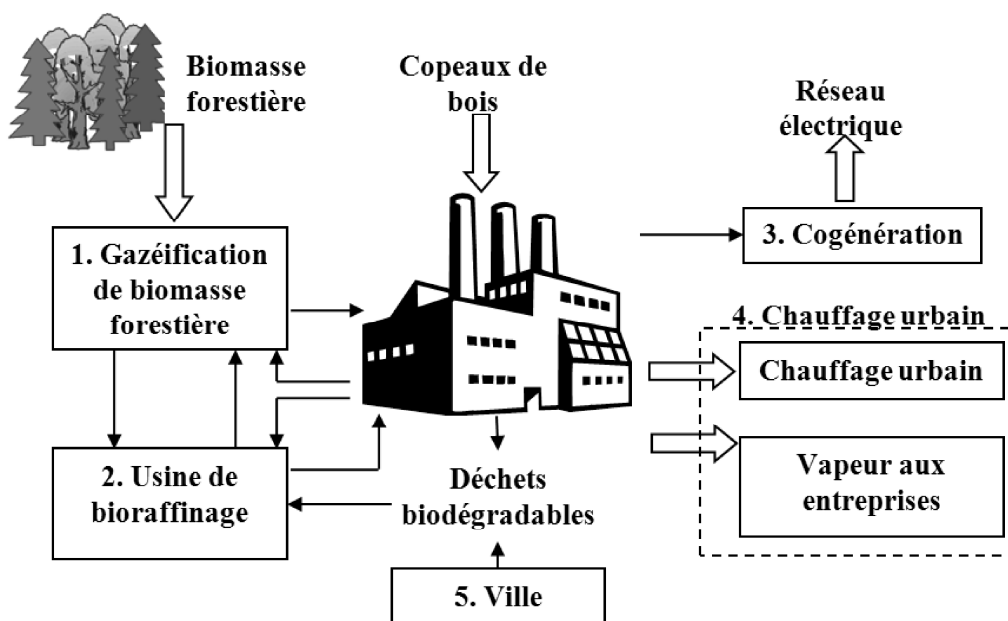


Figure 1 : Grappe éco-industrielle potentielle autour d'une usine de pâte Kraft.

1.2 Problématiques et objectifs

L'instauration de grappes éco industrielles, telles qu'elles ont été présentées dans l'introduction permettrait une meilleure gestion globale de l'énergie. Cependant, peu d'investisseurs s'intéressent aux réseaux de chauffage urbain dans les petites villes et petits villages canadiens à cause des faibles densités de demande thermique. Une étude a pourtant prouvé qu'en considérant une aide gouvernementale à hauteur de 15% des investissements totaux, de telles installations pourraient être techniquement et économiquement envisagées dans le cas d'un village dans l'est du Canada (Marinova et al., 2008). Il serait donc intéressant de définir certains critères de faisabilité qui permettraient de conclure rapidement à la pertinence de réaliser des études de faisabilité plus approfondies. Certains auteurs ont proposé l'utilisation de seuils de densité de demande thermique dont plusieurs valeurs recensées dans la littérature ont été répertoriées dans les tableaux 2 et 3. Certaines des informations présentées correspondent aussi à des densités qui sont observées dans le cas de chauffage urbain dans des zones où la consommation de chaleur par kilomètre carré est faible. Les conditions d'urbanisation et climatiques différentes font que ces seuils ne peuvent transposés directement pour les villes et villages canadiens. Pour déterminer de tels critères, d'autres études devraient être réalisées en plus de celle de Marinova et al. (2008). Cependant, ces études sont généralement longues, dispendieuses et demandent une grande

implication de la part des gouvernements locaux pour obtenir les données nécessaires dont la disponibilité et le format varient d'une municipalité à l'autre. **L'objectif principal** de ce mémoire consiste donc à développer une méthodologie qui permettrait de simplifier les études de faisabilité préliminaire, pour les réaliser rapidement, à moindre coût, et avec des données facilement accessibles. L'atteinte de cet objectif s'accompagne des **objectifs secondaires** suivants :

- Examiner la littérature concernant le chauffage urbain dans le but de bien saisir les éléments pertinents à inclure dans une étude de faisabilité.
- Analyser les difficultés rencontrées au cours d'une étude de faisabilité d'un réseau de chauffage urbain réalisée par Marinova et al. (2008) et Alao (2007) pour déterminer quelles étapes pourraient être simplifiées afin de faciliter l'accomplissement d'une telle étude.
- Étudier les méthodes d'évaluation de la demande de chaleur pour en retenir une répondant aux critères de sélection fixés.
- Valider la méthode proposée avec les résultats d'une étude de faisabilité d'un réseau de chauffage urbain réalisée par Alao (2007) et Marinova, et al. (2008).
- Appliquer la méthodologie à trois nouvelles études de cas dans le but de vérifier l'applicabilité de la méthodologie dans différentes conditions.
- Déterminer comment les résultats obtenus peuvent être intégrés dans une étude préliminaire de faisabilité d'un réseau de chauffage urbain.

Dans le cadre de ce mémoire, l'emphase a d'abord été mise sur la consommation de chaleur des édifices résidentiels. Cependant, étant donné leur grande demande énergétique, les édifices commerciaux et institutionnels ont aussi été abordés et une méthodologie adaptée a été développée.

1.3 Plan de travail

Les principales étapes de la démarche adoptée dans ce mémoire sont présentées dans le diagramme de la figure 2. Dans un premier temps, une revue de littérature recense les principaux avantages et inconvénients concernant l'installation de réseaux de chauffage urbain. La revue de

littérature décortique aussi une étude de faisabilité pour juger des exigences et de l'importance des différentes étapes du processus. L'aspect de l'évaluation de la demande de chaleur des bâtiments y joue un rôle critique ce qui justifie qu'une attention particulière y soit portée. Différentes méthodes d'évaluation de la demande thermique des bâtiments sont donc tirées de la littérature et analysées afin d'en retenir une qui pourrait faciliter le processus d'évaluation de la faisabilité tout en gardant une bonne précision des résultats. À cette étape, l'accent est mis sur la facilité et la rapidité d'utilisation de la méthode, mais aussi sur la qualité des résultats fournis.

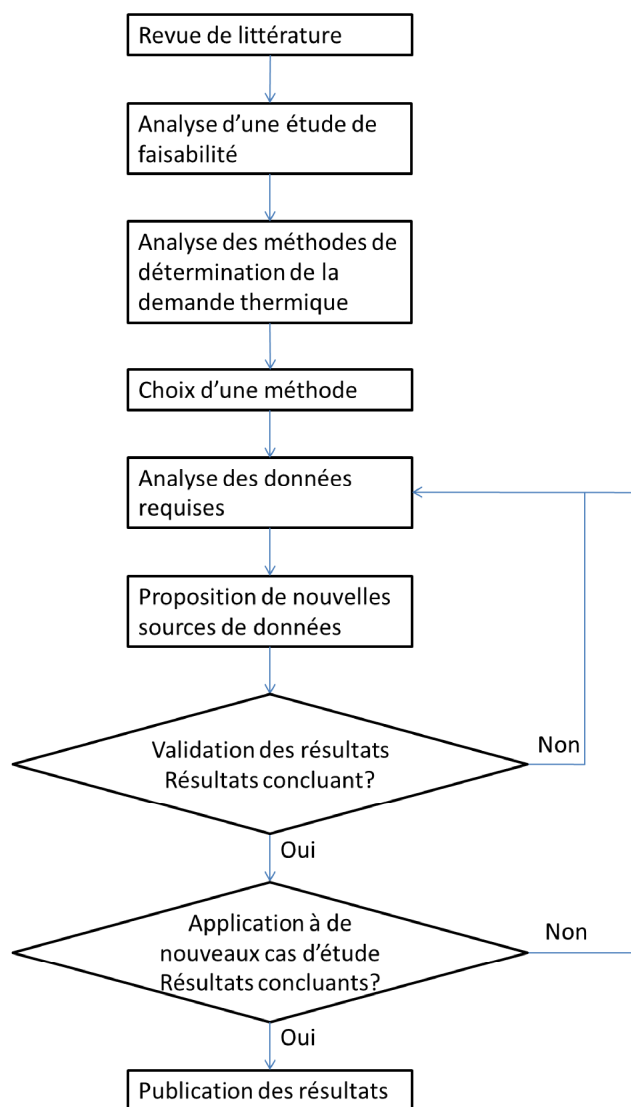


Figure 2 : Représentation schématique du plan de travail

L'étape suivante consiste à énumérer les données requises par cette méthodologie et proposer des sources alternatives qui pourraient être adoptées dans le cas de groupes de bâtiments résidentiels construits au Canada. Encore une fois, une attention particulière est portée à cette étape afin d'obtenir des données d'ordre général, rapidement et aisément accessibles.

La méthode et les données proposées sont ensuite validées par l'application à un cas dont la faisabilité a été étudiée par Alao (2007) et Marinova et al. (2008). Les résultats obtenus par ces auteurs sont comparés à ceux obtenus par l'entremise de la nouvelle méthodologie afin de déterminer les impacts des modifications apportées. À ce point, une boucle de rétroaction s'insère dans le déroulement des étapes de ce travail : si les résultats sont jugés inacceptables en vue de l'utilisation pour une étude de faisabilité préliminaire, un retour sur l'évaluation des sources de données est fait. Si les résultats sont jugés acceptables, la démarche est poursuivie à l'étape suivante.

Trois nouvelles études de cas sont ensuite réalisées pour expérimenter l'utilisation de la méthodologie dans diverses conditions d'urbanisation (densité, type et disposition des bâtiments), d'emplacements géographiques (deux villes dans l'est du Canada et une dans l'ouest), de gouvernances locales et avec différentes proximités des usines. La figure 3 indique l'emplacement des trois nouveaux cas étudiés (A, B et C) en plus du cas (Validation) présenté par Alao (2007) et Marinova et al. (2008). Les figures 8, 9, 10 et 11 représentent respectivement la disposition géographique des cas Validation, A, B et C et les tableaux 6 et 7 présentent diverses statistiques les concernant. Les données de population montrent que les cas de validation et C sont de petits villages avec des pourcentages élevés de maisons unifamiliales. Les cas A et B sont plutôt des villes de taille moyenne, la première ayant un taux de maisons unifamiliales plus bas que la seconde. Concernant les années de construction, la majorité des bâtiments ont été construits avant 1980 dans tous les cas. Plus particulièrement, dans le cas de validation, les bâtiments ont principalement été construits avant l'année 1960. Dans les cas B et C, ils ont surtout été construits entre les années 1960 et 1980 tandis que le cas A montre une augmentation constante du nombre de bâtiments au fil du temps. Encore une fois, une boucle de rétroaction est proposée dans le déroulement des étapes du travail, si les résultats obtenus sont jugés inacceptables, un retour sur l'évaluation des sources de données est imposé. Dans le cas contraire, la démarche est poursuivie à l'étape suivante qui consiste à publier les résultats.

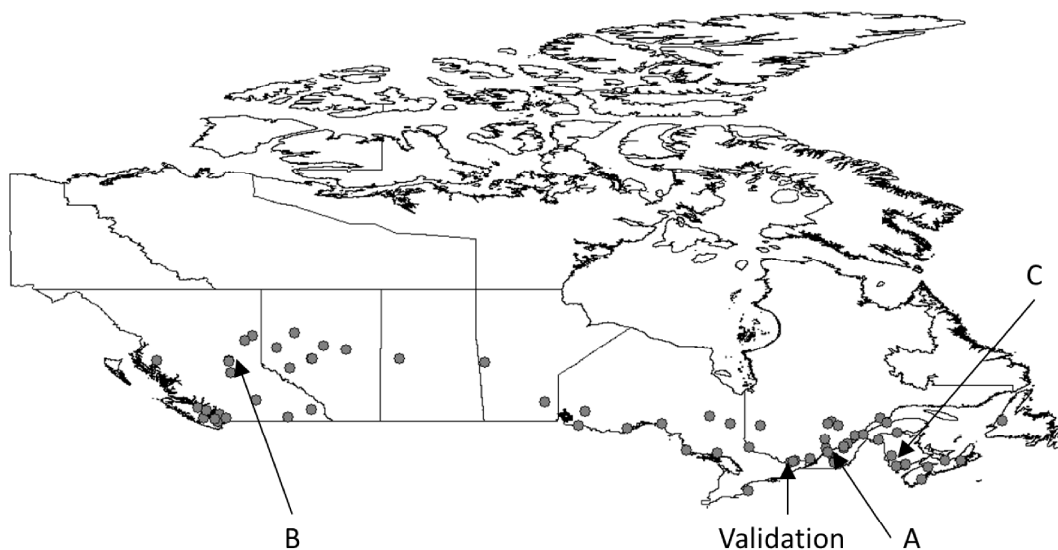


Figure 3 : Positionnement des différentes études de cas parmi les usines papetières au Canada.

Il est à noter que les boucles de rétroaction proposent un retour sur l'évaluation des sources de données et non sur l'évaluation de la méthode de détermination de la demande de chaleur. La décision de ne pas modifier la méthode d'évaluation de la demande de chaleur des bâtiments repose sur deux arguments : premièrement, la précision des résultats obtenus est jugée convenable pour l'utilisation dans le cadre d'une étude de pré-faisabilité. Deuxièmement, puisqu'il s'agit de la même méthode utilisée par Marinova et al. (2008), une comparaison entre les résultats obtenus permettra d'estimer directement l'erreur introduite par les modifications des sources de données.

1.4 Organisation du mémoire

Pour faire suite à cette introduction, le deuxième chapitre détaille les principaux avancements technologiques concernant le chauffage urbain et les techniques d'évaluation de la demande de chaleur des bâtiments. Le troisième chapitre présente la méthodologie développée pour évaluer la demande thermique des édifices résidentiels. Le quatrième chapitre propose une version préliminaire d'une méthode d'évaluation de la charge thermique pour les bâtiments commerciaux

et institutionnels. Divers aspects généraux du projet sont discutés au cinquième chapitre. Le mémoire se conclut au sixième chapitre à la suite duquel une liste de référence est présentée.

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

La revue de littérature se divise en deux sections. Dans un premier temps, divers aspects des réseaux de chauffage urbain sont traités à commencer par une définition générale suivi d'une description détaillée des trois parties : la source de chaleur, le réseau de distribution ainsi que les clients. L'historique est ensuite retracé jusqu'à aujourd'hui pour comprendre l'origine de cette technologie ainsi que sa distribution géographique. Étant donné les particularités des villes et villages papetiers, une section traite des réseaux alimentés par des usines ainsi que de ceux installés dans des zones à faible densité de demande thermique. Les principales associations de réseaux de chauffage sont aussi présentées puisqu'elles permettent un contact direct avec le milieu technique. Par la suite, les grandes étapes des études de faisabilité à réaliser avant l'implantation des réseaux sont résumées.

Dans un deuxième temps, un survol des principales méthodes d'évaluation de la charge thermique des bâtiments est proposé. Celles-ci sont divisées en deux catégories : les méthodes d'ingénierie traditionnelles qui analysent généralement la consommation des bâtiments individuels, puis les méthodes de modélisation qui s'adressent plutôt aux groupes de bâtiments.

2.1 Description des réseaux de chauffage urbain

Le chauffage urbain se définit comme « une distribution de chaleur à un certain nombre d'immeubles d'une ville, d'un quartier ou d'un ensemble immobilier : cette distribution se fait par un fluide chauffant circulant dans un réseau de tuyauteries » (Narjot, 2005). Des expressions telles que : chauffage à distance, chauffage centralisé, chauffage collectif, chauffage de district et chauffage d'îlots ou par îlots sont aussi utilisées pour représenter cette technologie. La locution réseau de chauffage peut aussi être entendue, mais les spécialistes préfèrent la réserver à l'infrastructure physique qui transporte l'eau chaude entre les immeubles (Narjot, 2005). La meilleure efficacité du chauffage urbain par rapport aux méthodes de chauffage individuelles est basée sur trois principes (Church, 2007a) :

- Le fait de rassembler les besoins de chaleur de plusieurs clients atténue les pointes de demandes permettant à la chaudière d'opérer plus souvent à son point optimal.

- Les chaudières ont, en général, une marge de sécurité pour pallier aux imprévus. La marge de sécurité d'une chaudière centrale est inférieure à la somme de toutes les surcapacités des chaudières individuelles ce qui permet de choisir une chaudière mieux adaptée aux besoins.
- Un contrôle plus serré des paramètres d'opération est réalisée sur les grandes chaudières permettant une meilleure combustion.

2.1.1 La production de chaleur

Étant donné l'importante capacité de combustion requise pour les chaudières utilisées pour le chauffage urbain, il est économiquement intéressant de se munir d'une chaudière s'adaptant à plusieurs types de combustibles permettant ainsi d'opter pour le plus économique lors de l'achat. Les principales sources de chaleur recensées pour les chauffages urbains sont : les combustibles (charbon, gaz, mazout, ordures ménagères, biomasse), les rejets industriels, la géothermie, l'énergie nucléaire et solaire (Euroheat, 2006;Narjot, 2005). Avec la diminution des stocks de carburant fossile et leurs effets néfastes sur l'environnement prouvés avec le temps, de plus en plus de réseaux se tournent vers des sources de chaleur renouvelables. Un document produit par Euroheat (2006), une association européenne promouvant les réseaux de froid et de chaleur, relate quelques succès avec les plus populaires de ces sources: biomasse, géothermie, soleil, incinération des déchets, surplus d'énergie industriels.

Pour calculer la capacité d'une chaudière d'un réseau de chaleur, deux éléments essentiels doivent être considérés : la demande de pointe et la demande cumulative annuelle (consommation). La première correspond à la puissance maximale exigée par le réseau dans les pires conditions éventuellement rencontrées lors de son opération tandis que la deuxième est le cumul de toute l'énergie qui doit être transmise aux clients durant une année(Vallios et al., 2009).Pour la demande de pointe, Alao (2007) a développé une procédure de calcul en assumant que celle-ci peut être estimée par la puissance moyenne du mois le plus froid. Elle est donc calculée en divisant la consommation de chaleur des clients en suivant une fonction inversement proportionnelle à la température parmi les mois de chauffage. Les puissances mensuelles requises sont obtenues en divisant la consommation mensuelle par le nombre d'heures de chauffage. La puissance nécessaire pour le réseau est estimée par la plus grande des puissances mensuelles. En adoptant cette procédure de calcul, il est considéré que l'usine papetière peut subvenir aux

pointes de demande de chaleur du réseau avec ses propres chaudières d'appoint. Dans le cas contraire, il pourrait s'agir d'un facteur limitant la grosseur du réseau. Cependant, dans la plupart des cas traitant de municipalités papetières, le principal facteur restreignant l'expansion du réseau de chauffage est la densité de demande de chaleur trop faible en périphérie. C'est pourquoi les chaudières d'appoint des réseaux de chauffage urbain ne sont pas traitées plus en détails dans ce mémoire. Les principales méthodes d'évaluation de la demande cumulative de chaleur, quant à elle, sont décrites à la section 2.2.

2.1.2 La distribution de la chaleur

Le coût d'installation d'un réseau de distribution de chaleur compte pour environ 30 à 60% (Mackenzie-Kennedy, 1979) de la valeur totale du réseau, ce qui en fait la partie la plus coûteuse des infrastructures. La part de l'investissement accordée au réseau est d'autant plus importante dans la cadre de cette étude étant donné qu'en récupérant la chaleur des usines papetières, il ne faut donc pas considérer d'investissement pour l'achat d'une chaudière. L'investissement initial pour les réseaux est particulièrement important puisque leur durée de vie varie de 5 à 30 ans (Narjot, 2005). Pour l'installation, il faut compter 2 à 3 fois le coût des tuyaux (J. Laganière, communication personnelle, 2009). Reidhav & Werner (2008) ont estimé le coût de l'entretien de la tuyauterie à 2 €/mètre. année et celui d'une sous-station de transfert à 80 €/année.

2.1.2.1 Configuration du réseau

Les réseaux peuvent adopter deux types de configuration : linéaire ou cyclique.

Linéaire : selon ce type de configuration, les clients sont raccordés par un seul lien au fournisseur de chaleur. Par conséquent, si ce lien est rompu par un bris dans le réseau, l'alimentation en chaleur est automatiquement coupée. Cette configuration permet de limiter la quantité de tuyaux nécessaires pour la construction du réseau. Il s'agit de la configuration la plus répandue actuellement sur le marché. La figure 4 montre un exemple de ce type de configuration (POLYCITY, 2006).

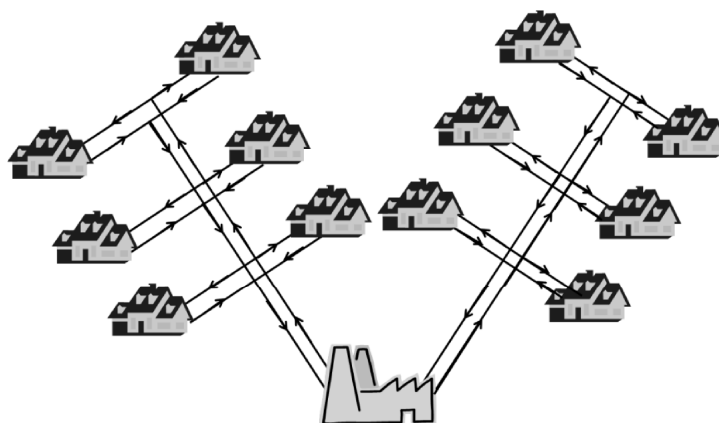


Figure 4 : Exemple de configuration linéaire.

Cyclique : la configuration cyclique consiste à relier le fournisseur de chaleur avec plusieurs liens permettant ainsi de réduire au minimum les risques de pannes du réseau. Ce type de réseau est particulièrement intéressant dans les cas où le réseau pourrait être agrandi. Ce type de réseau nécessite cependant un investissement plus important pour la mise en place des infrastructures. La figure 5 montre un exemple de ce type de configuration (POLYCITY, 2006).

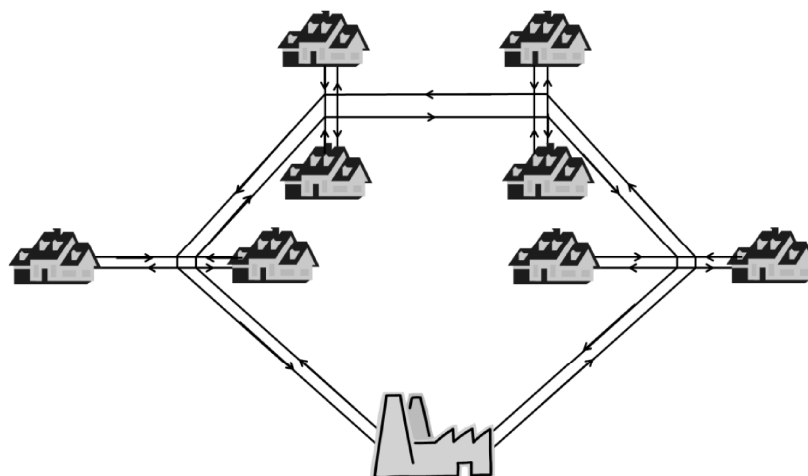


Figure 5 : Exemple de configuration cyclique.

2.1.2.2 Vitesse d'écoulement

Pour les réseaux de chauffage à eau chaude, une vitesse d'écoulement maximale de 1,2 m/s est recommandée lorsque le diamètre des tuyaux est inférieur à 50 mm. Pour un diamètre supérieur, la limite est plutôt fixée par la perte de pression qui ne doit pas dépasser 50 Pa/m. De plus, pour minimiser l'érosion, la vitesse d'écoulement ne doit pas dépasser 3 m/s pour un réseau qui fonctionne toute l'année (ASHRAE, 2008). Il est important de bien respecter ces critères car des

tuyaux trop petits entraînent une augmentation du niveau de bruit, de l'érosion et des coûts de pompage tandis que des tuyaux trop grands accroissent inutilement les coûts d'installations (Haixiong, 2004).

2.1.2.3 Température d'alimentation

Traditionnellement, pour le réseau secondaire, la température de l'eau alimentant les clients tourne autour de 90°C (Church, 2007b). Des températures plus basses peuvent être utilisées pour limiter les pertes de chaleur. Cependant, puisque la vitesse d'écoulement est limitée, des tuyaux plus gros sont nécessaires pour apporter suffisamment de chaleur (Skagestad & Mildenstein, 1999). Par conséquent Polycity (2006) a calculé, une augmentation du prix de vente la chaleur aux clients de l'ordre de 4% à 6% pour une diminution de température de 90°C à 70°C. Un compromis possible consiste à adopter une température plus élevée l'hiver, lorsque les besoins sont plus importants, et à l'abaisser l'été (Church, 2007). Dans les cas où la chaleur est utilisée pour l'eau chaude sanitaire, il est important de s'assurer que la température d'alimentation chez les clients ne descend pas en-dessous de 70°C (RETScreen International, 2005).

La température de retour de l'eau du réseau secondaire est établie en fonction d'un différentiel visé chez les clients. En optimisant un réseau alimenté par une usine papetière dans un mono industriel dans l'est du Canada, Gervais et al. (2007) a calculé un différentiel de 45°C pour une température de retour aux environs de 38°C.

Pour le réseau primaire, la température d'alimentation varie en fonction de la source d'énergie. Gervais et al. (2007) a calculé une valeur de 110°C pour le même réseau dans l'est du Canada. La température de retour de l'eau varie en fonction de l'utilisation de la chaleur des clients.

2.1.2.4 Pertes de chaleur du réseau de chaleur

Plusieurs facteurs influencent les pertes de chaleur dans un réseau de chauffage urbain. Par exemple, une couche de neige au sol isole celui-ci ce qui permet de mieux conserver la chaleur (RETScreen, 2005). Peu d'auteurs proposent de valeur de perte de chaleur et il existe une grande disparité entre celles qui sont données :

- RETScreen (2005) estime qu'un réseau de chaleur moderne perd environ 2% à 3% de toute la chaleur produite à l'extérieur;

- Çomakli et al. (2004) ont observé une valeur de 8,62% pour un réseau au Danemark d'environ 12 km avec un diamètre variant de 65 à 250 mm. Les températures en amont varient entre 175°C et 85°C et celle en aval entre 110°C et 65°C;
- Poredos & Kitanovski (2002) ont calculé une perte de chaleur d'environ 8 à 10% dans le réseau qu'ils ont utilisé pour leurs travaux réalisés en Slovénie. Les températures en amont variaient entre 160°C et 110°C et celles en aval variaient entre 90°C et 40°C;
- Une valeur moyenne de 20% est obtenue en se basant sur les caractéristiques de tous les réseaux de chauffage urbain au Danemark de la Danish Energy Agency (2008);
- Reidhav & Werner (2008) proposent une valeur moyenne de 23% obtenue d'une étude de 74 zones à faible densité du réseau de Göteborg (Suède). Prises individuellement, les pertes oscillent entre 12 et 43%. Ce réseau compte en moyenne 29 mètres de tuyau par maison.

En général, la densité de demande calorifique semble avoir un impact très important sur les pertes de chaleur à l'environnement. Aucune valeur n'a été recensée pour le Canada dans la littérature. Cependant, puisque les petites municipalités canadiennes ont généralement de faibles densités de demande calorifique et puisqu'il faut de longs tuyaux pour atteindre les sites de consommation, les pertes de chaleur risquent d'être plus importantes. Il est donc plus sécuritaire d'opter pour une valeur de perte de chaleur relativement élevée, autour de 20% d'autant plus qu'il s'agit d'une valeur moyenne observée sur plusieurs zones de faible densité de consommation de chaleur d'un réseau en Suède (Reidhav & Werner, 2008) et plusieurs réseaux au Danemark (Danish Energy Agency, 2008).

2.1.3 L'utilisation de la chaleur

2.1.3.1 Investissement requis

Pour faciliter l'installation d'un système de chauffage urbain, l'idéal est de prévoir sa mise en place avant la construction des bâtiments. La tuyauterie nécessaire pour la circulation de l'eau peut ainsi être installée simultanément. Toutefois, cette étude vise l'implantation de réseaux de chauffage dans des quartiers déjà établis. Il faut donc tenir compte des investissements

nécessaires pour adapter les bâtiments actuels au chauffage urbain tel qu'indiqué dans le tableau 1.

Tableau 1 : Estimation des investissements requis pour la conversion au chauffage urbain d'un édifice existant (Alao, 2007)

Type de bâtiment		Investissement requis par surface de plancher ¹	Investissement moyen requis par bâtiment ¹
Maison uni-familiale type au Québec	chauffée à l'eau chaude	47\$/m ²	5 750\$
	autre type de chauffage	76\$/m ²	9 200\$
Autres édifices	chauffés à l'eau chaude	17\$/m ²	7 700\$
	autres types de chauffages	60\$/m ²	17 400\$

2.1.3.2 Type de raccordement

Il existe deux types de connexion : directe et indirecte. La première consiste à envoyer directement l'eau chaude dans les dispositifs de chauffage du client tandis que par la deuxième, l'eau chaude du réseau de distribution est circulée dans un échangeur de chaleur pour transférer l'énergie à un réseau interne chez les clients. Le principal avantage des connexions directes est la réduction de l'investissement initial et la diminution des pertes de chaleur. Les clients n'ont donc pas l'obligation d'acheter et entretenir un échangeur ainsi qu'une pompe pour faire circuler l'eau chaude dans leur bâtiment. Les connexions indirectes, quant à elles, offrent l'avantage de ne pas mélanger l'eau du réseau de distribution principal à celle du client. Ainsi, un mauvais entretien de la tuyauterie chez les clients n'entraîne pas une dégradation de la qualité de l'eau du réseau principal aidant à réduire l'usure prématurée des canalisations. Un autre avantage des connexions indirectes est que le réseau principal n'est pas influencé par les pertes d'eau chez les clients. (ASHRAE, 2008)

¹Incluant les coûts de raccordement et de la sous-station de transfert chez les clients.

2.1.3.3 Tarification

Il existe deux types de tarification : la tarification forfaitaire et la tarification binôme. La tarification forfaitaire consiste à charger un montant fixe à chacun des clients peu importe la consommation. La tarification binôme consiste plutôt à charger un montant fixe ainsi qu'un montant variable en fonction de la consommation. La première méthode de facturation est très peu répandue car elle ne permet pas de mettre de l'avant des programmes d'économie d'énergie. Cependant, la facturation variable basée sur la consommation de chaleur nécessite l'installation de compteurs de chaleur augmentant les investissements nécessaires (Narjot, 2005).

2.1.3.4 Densité de demande thermique

La densité de demande thermique est un des éléments clés qui détermine la faisabilité d'un réseau de distribution de chaleur. Il s'agit de la quantité d'énergie consommée par les clients ou de la puissance totale, divisée par la longueur de tuyau ou par la surface couverte par le réseau. Une haute densité de demande thermique permet de vendre une plus grande quantité de chaleur en requérant moins de tuyaux. Sous une certaine densité, il est possible que le réseau soit trop étendu, occasionnant ainsi d'importantes pertes de chaleur et un investissement initial trop important. Il peut alors être plus rentable, du point de vue économique et environnemental, d'opter pour des systèmes de chauffage individuels. En considérant seulement les émissions de gaz à effet de serre, Fröling(2004) et Reidhav & Werner (2008) ont déterminé qu'il est préférable de remplacer les fournaies à l'huile par un système de chauffage de district lorsque le réseau dépasse une valeur seuil de 0,7GJ/m. Le tableau 2 présente une échelle de densité permettant de juger de l'opportunité d'un nouveau réseau. Les tableaux 3 et 4 présentent d'autres valeurs seuils basées respectivement sur l'énergie consommée et la puissance par les clients, qui ont été proposées ou observées dans la littérature.

Tableau 2 : Densités favorisant l'implantation du chauffage urbain (Yildirim et al., 2006; Karlsson, 1982).

Prédisposition au chauffage urbain	Densité de demande (MW/km ²)	Types de bâtiments
Très favorable	> 70	Centre-ville; gratte-ciel
Favorable	51-70	Centre-ville; multi-étagé
Possible	20-51	Environnement urbain
Discutable	12-20	Résidences multifamiliales
Impossible	< 12	Résidences unifamiliales

Tableau 3 : Seuils de rentabilité (énergie) pour l'installation de chauffage urbain.

Seuil proposé par unité de surface (MWh/km ²)	Seuil proposé par unité linéaire (MWh/km)	Lieu	Seuil proposé ou observé	Auteur
73 900	5 280	Canada	Observé ¹	Marinova et al., 2008
n/d	556	Suède	Proposé	Reidhav & Werner, 2008
10 000	300	Suède, Finlande, Danemark	Proposé	Zinko et al., 2008
n/d	500	Europe	Proposé	Energy Charter Secretariat, 2006

Tableau 4 : Seuils de rentabilité (puissance) pour l'installation de chauffage urbain.

Seuil proposé par unité de surface (MW/km ²)	Seuil proposé par unité linéaire (MW/km)	Lieu	Seuil proposé ou observé	Auteur
40	4	France	Proposé	Narjot, 2005
12	n/d	Turquie	Proposé	Yildirim et al., 2006; Karlsson, 1982

¹Valeur observée dans le cadre d'une étude de chauffage urbain dans une ville de l'est du Canada avec une aide gouvernementale à hauteur de 15% de l'investissement total.

Dans le tableau 3, les valeurs de Reidhav & Werner (2008) et de Energy Charter Secretariat (2005) sont à peu près du même ordre et elles ont été obtenues en se basant sur des réseaux établis dans le nord de l'Europe. Reidhav & Werner (2008) ont aussi proposé une condition supplémentaire à la connexion de bâtiments dans les zones à basse densité de consommation de chaleur, soit une demande annuelle minimale de 50 GJ. Zinko et al. (2008) ont obtenu une valeur un peu plus basse grâce à l'application de mesures d'amélioration de la rentabilité. En calculant

la moyenne de toutes les données du tableau 25, la valeur de 72 GJ obtenue permet d'estimer la consommation de chaleur dans un bâtiment pour les cas de validation et A au Canada. Cela représente donc environ huit bâtiments dans le cas de Reidhav & Werner (2008). Il s'agit ici d'un nombre équivalent de bâtiment au Canada. En Suède, le nombre bâtiments par kilomètre est probablement plus élevé étant donné leur moins grande consommation.

La valeur observée par Marinova et al. (2008) est la plus élevée du tableau, mais il faut préciser qu'elle fait classe à part. Il s'agit en fait d'une valeur obtenue dans le cadre d'une étude de faisabilité pour un réseau à but non lucratif subventionné à hauteur de 15% dans une petite communauté dans l'est du Canada. Dans ce cas, les bâtiments sont déjà construits et les modifications apportées sont plus coûteuses que pour les constructions neuves. De plus, contrairement aux autres valeurs, il s'agit d'un cas précis dont les investissements peuvent être plus importants que la normale au Canada. Avec la même valeur moyenne calculée du tableau 25, cela représente un équivalent de 72 bâtiments par kilomètre de tuyaux. Cette valeur est assez élevée et mériterait d'être consolidée par d'autres études de faisabilité dans des villages papetiers au Canada. Quoiqu'il en soit, comme l'a confirmé un expert du domaine (P. Blain, communication personnelle, 2009), une valeur plus élevée au Canada ne devrait pas surprendre étant donné que l'expertise et la technologie ne sont pas aussi avancées que dans les pays du nord de l'Europe. De plus, les sources alternatives d'énergie pour le chauffage moins coûteuses au Canada augmentent aussi ces seuils.

Dans le tableau 4, la valeur proposée par Narjot (2005), est la plus élevée. Cette situation s'explique par le fait que cette valeur a été proposée dans les années 1995 où les réseaux à faible densité de demande énergétique étaient peu étudiés. Yildirim et al. (2006) et Karlsson (1982) proposent une valeur moins élevée sur un site universitaire pour un opérateur de réseau sans but lucratif.

2.1.4 L'histoire du chauffage urbain

Le chauffage urbain semble tirer ses origines de deux sources distinctes : l'hypocauste et l'ondol. Ces deux types de chauffage reposent sensiblement sur les mêmes principes de conception : la chaleur produite par un foyer est circulée au travers d'espaces aménagés sous les planchers et dans les murs des bâtiments à chauffer. L'origine des ondols remonte aux années 1300 avant J.-C. chez les Coréens qui utilisent encore largement ce type de chauffage aujourd'hui. Concernant

l'hypocauste, des vestiges datant de 2500 ans avant J.-C. ont été découverts en Grèce. Toutefois, le principe semble avoir véritablement mis au point un peu plus tard par les Romains. La littérature confirme que les hypocaustes étaient principalement utilisés pour chauffer les maisons de la bourgeoisie. Au deuxième siècle après J.-C., le système est étendu au chauffage des bains publics. L'intérêt pour les hypocaustes tombe avec la chute de l'empire Romain au profit d'appareils de chauffage pour des chambres individuelles comme les foyers (Raoult, 2008).

Il est difficile de retrouver la date exacte de la première application du chauffage urbain moderne, mais il semble que ce soit à Chaudes-Aigues en France, en 1332. Trois maisons sont alors reliées à un système de canalisation en bois distribuant la chaleur provenant d'une source géothermique (Chaudes Aigues, 2009). Toutefois, la véritable diffusion des systèmes de chauffage centralisés pour les maisons revient plus tard dans l'histoire, à partir de 1851, alors que le Crystal Palace, à Londres, se dote de ce type de chauffage. En 1853, un second réseau de chauffage urbain est inauguré à l'Académie navale d'Annapolis (États-Unis). Il s'agit du plus vieux réseau au monde toujours en opération. Quant au premier réseau à vocation commerciale, il est mis en place en 1877 par Birdsill Holly à Lockport, dans l'état de New York. Voyant l'immense potentiel de cette nouvelle technologie, Holly étend sa compagnie, la New Holly Steam Combination Ltd., à plus de 300 villes canadiennes et américaines en 1932 (Raoult, 2008). Au Canada, c'est à 1880 que remonte le premier système de chauffage urbain dans la ville de London en Ontario. Le premier réseau à vocation commerciale est installé en 1924, dans la ville de Winnipeg, pour chauffer quelques immeubles du quartier commercial (Enwave, 2007).

À cette époque déjà, les principaux réseaux de chauffage urbain sont basés sur la cogénération. L'électricité est produite localement dans les centres-villes et les rejets de vapeur sont utilisés pour chauffer les bâtiments environnants. Cependant, la pollution causée par la présence de ces usines, généralement chauffées au charbon, et l'arrivée de nouvelles technologies plus efficaces pour la production et le transport de l'électricité causent le déplacement des centrales électriques loin des grands centres urbains ainsi que le commencement du déclin des réseaux de chauffage. L'intérêt décline d'autant plus avec l'augmentation des prix des combustibles fossiles, utilisés traditionnellement dans ces usines ainsi que les nouvelles tendances en urbanisation qui favorisent le développement de chauffages locaux dans les édifices. Ainsi, aux États-Unis, d'environ 250 en 1951, le nombre de réseaux de chauffages urbain est réduit à 59 dans les années 1980 (Committee on District Heating and Cooling. National Research Council, 1985).

Aujourd'hui, l'arrivée de nouvelles technologies de combustion plus propre et l'augmentation générale des prix de l'énergie favorise la réintégration des usines de cogénération. Elles permettent d'utiliser jusqu'à 85% de l'énergie de combustion comparativement à seulement 17% à 25% dans le cas d'une production d'électricité seulement (POLYCITY, 2006). Même si une efficacité de 60% a été atteinte dans certaines centrales électriques à combustion modernes, une grande partie de la chaleur est rejetée dans l'atmosphère (Torekov et al., 2007).

Au Canada, malgré le climat nordique qui entraîne une plus grande consommation énergétique pour le chauffage, la basse densité de demande thermique des régions rurales nuit au développement des réseaux de chauffage urbain. À cela s'ajoute le coût réduit des sources d'énergie alternatives comme l'électricité et le gaz naturel. Cependant, ces sources d'énergie ne sont pas épargnées par l'augmentation des prix de l'énergie ce qui rend l'alternative du chauffage urbain de plus en plus intéressante.

Aujourd'hui, le nombre de réseaux de chauffage urbain aux États-Unis est évalué à environ 500 (International District Energy Association, 2005) tandis que le Canada en compte environ 150 (Enwave Canada, 2007). L'Europe, quant à elle, n'a pas connu le même déclin du chauffage urbain à cause des prix plus élevés de l'énergie. Ainsi, certains pays comme l'Islande, où la chaleur est obtenue principalement par géothermie, chauffe plus de 95% des immeubles avec cette technologie. Le tableau 5 fournit les taux d'adhésion de certains pays en Europe. Le plus gros réseau recensé à ce jour se trouve en Russie, à Saint-Pétersbourg, avec une production annuelle en 2001 estimée à 66 000 GWh, suivi de Moscou, avec une production de 42 000 GWh (Pierce, 2009). Au Canada, le plus gros réseau est opéré par Enwave dans le centre-ville de Toronto (Enwave Canada, 2007).

Tableau 5 :Pourcentages de bâtiments utilisant le chauffage urbain dans plusieurs pays européens et au Canada. Tiré de (Froning, 2003), sauf mention contraire.

Pays	% d'utilisation
Islande	95
Russie	70
Lituanie ¹	70
Lettonie ¹	68
Danemark ¹	50
Estonie	52
Pologne	52
Suède	50
Slovaquie	40
Finlande	49
Hongrie	16
Autriche	12,5
Allemagne	12
Pays-Bas	3
Canada ²	1,3
Royaume-Uni	1

1. Energy Charter Secretariat, 2005

2. Canadian District Energy Association, 2009

2.1.5 Les réseaux à faible densité de demande thermique

Dans certains pays comme la Suède, les marchés traditionnels du chauffage urbains, soit les commerces, les édifices à bureaux et à appartements, ont atteint un niveau de saturation. Pour prendre de l'expansion, les compagnies de chauffage urbain doivent donc se tourner vers les maisons unifamiliales où l'on jugeait auparavant que la densité de demande thermique était insuffisante (Forsaeus Nilsson et al., 2008). En fait, cinq pays ont commencé à implanter les réseaux de chauffages dans les zones à basse densité, il s'agit de l'Islande, du Danemark, des Pays-Bas, de la Finlande et de la Suède (Reidhav & Werner, 2008). Étant donné que les systèmes de chauffage urbain ont déjà fait leurs preuves dans ces pays, la communauté scientifique déploie beaucoup d'effort pour mettre au point de nouvelles techniques de construction des réseaux de

chaleur permettant de compenser la diminution des profits. En comparant la Finlande et la Suède, Lygnerud & Peltola-Ojala (2009) ont démontré une meilleure performance des réseaux de chauffage urbain alimentant des maisons individuelles du premier. Cette situation est expliquée par les coûts de vente de la chaleur aux clients moins élevés en Finlande, rendus possible par une utilisation intensive de la géothermie, de la chaleur résiduelle des industries ainsi qu'une consommation par client plus importante.

Certaines améliorations techniques permettent aussi d'atteindre des densités de demande de chaleur plus basses. Par exemple, McCallum (1997) propose d'enfouir les tuyaux à seulement 60 cm sous la surface de la terre comparativement à 215 cm tel que l'a proposé Gervais (2007) dans le cadre d'une étude de faisabilité. Les tuyaux doivent toutefois bénéficier d'une meilleure isolation car les pertes de chaleur sont plus grandes (ASHRAE, 2008). Lors de la conception, Zinko et al. (2008) proposent de ne pas prévoir de capacité de réserve pour l'expansion éventuelle du réseau, à moins que celle-ci ne soit déjà planifiée. Ils ont aussi déterminé qu'un client type peut augmenter sa consommation de 5500 kWh à 7500 kWh en maximisant l'utilisation de la chaleur, par exemple, en chauffant l'eau sanitaire en installant des appareils électroménagers ou des systèmes de climatisation à pompe à chaleur utilisant l'énergie du réseau de chauffage au lieu de l'électricité. RETScreen International (2005) estime que l'utilisation de la chaleur du réseau pour chauffer l'eau sanitaire permet d'augmenter la consommation de 0 % à 25%. La mise en place du chauffage urbain en zone rurale comporte aussi quelques avantages tels que (Rafferty, 1996):

- Grande variété de combustibles disponibles à différents coûts : par exemple, la proximité de source de biomasse en milieu rural en diminue le coût d'approvisionnement. Cet avantage permet de réduire jusqu'à trois fois le prix des combustibles en comparant à un système de chauffage urbain semblable qui n'a pas un accès facilité à ces sources de combustibles.
- Disponibilité de terrains non-pavés pour l'installation du système de distribution : le fait d'avoir à retirer et réinstaller seulement une couche de pelouse permet de réduire les coûts d'installation du réseau. Dans certains cas, il est possible de n'avoir aucun revêtement de sol à réinstaller.

- Moins de services à croiser : en milieu rural, les services tel que les fils électriques, de téléphone et de câble sont gardés hors terre. De même, les réseaux de distribution de gaz naturel, d'aqueduc ainsi que les égouts sont moins élaborés ce qui facilite la planification et l'installation des canalisations d'eau chaude.
- Diminution des besoins de contrôle de la circulation durant la construction : la circulation, moins importante en milieu rural, requiert moins de contrôle. Dans plusieurs cas, il est même possible de fermer les rues locales.
- Potentiel d'utilisation de tuyaux non isolés : sous certaines conditions, il est possible d'utiliser des tuyaux non isolés pour le retour d'eau et même pour l'approvisionnement. Cependant, il faut prévoir des contrôles de températures supplémentaires pour assurer que l'eau arrive à une température suffisamment élevée chez les clients.

Un obstacle important à la mise en place d'un réseau de chauffage urbain est la réticence des clients à investir. Même si les calculs démontrent un important retour sur investissement, le long terme requis en rebute plus d'un. Des expériences d'investissements similaires ont déjà été rencontrées dans le cadre de projet raccordement d'immeubles au réseau d'égout municipal (J. Heath, communication personnelle, 2009). Pour assurer la réussite de l'implantation, il faut mettre de l'avant certains avantages tels que la grande fiabilité du système, les faibles coûts d'utilisation et d'entretien, le côté écologique de la source d'énergie (Delbès & Vadrot, 1985). Tromborg, et al. (2007) ont proposé quelques politiques qui faciliteraient l'implantation de réseaux de chauffage urbain. Certains pays vont même jusqu'à forcer l'abonnement des clients à l'intérieur d'un certain périmètre autour du réseau pour assurer un financement minimum (Narjot, 2005).

Des scientifiques suédois ont étudié 74 réseaux de chauffage urbain pour déterminer les limites d'installation dans les zones à basse densité. Sept facteurs assurant une meilleure rentabilité des réseaux de chauffage urbains dans ces secteurs ont été relevés (Reidhav & Werner, 2008) :

- Un marché qui permet un prix compétitif du chauffage urbain : certains aspects du marché comme un faible coût des combustibles utilisés pour le chauffage urbain ou des politiques environnementales des gouvernements peuvent améliorer la rentabilité du chauffage urbain.

- Haut taux d'utilisation du chauffage urbain dans chaque immeuble : une grande consommation de chaleur dans les bâtiments augmente les revenus de l'opérateur du réseau ce qui permet de rentabiliser plus rapidement l'investissement.
- Faible coût marginal de génération de chaleur : le coût de production par unité de chaleur doit rester faible.
- Faibles pertes de chaleur relatives du réseau : la longueur de tuyau requise pour distribuer la même quantité de chaleur pour des maisons unifamiliales que pour des édifices à logements est plus grande. Les pertes de chaleur par unité de tuyaux doivent donc être plus petites pour rester compétitif.
- Faibles coûts de maintenance et d'opération : des coûts de maintenance et d'opération plus faibles aident à compenser pour les revenus moins élevés du réseau.
- Faible retour sur investissement de la compagnie d'opération du réseau : étant donné les investissements plus importants requis pour vendre la même quantité de chaleur, les investisseurs doivent s'attendre à un taux de retour sur investissement plus petit que pour les réseaux chauffant des zones à densité de demande thermique plus élevée.
- Faibles coûts d'investissement par maison : par exemple, de courtes distances du tuyau pour connecter les maisons permettent de réduire les investissements. En général, la plus petite taille des réseaux permet l'utilisation du raccordement direct des clients puisque le risque de contamination de l'eau du réseau principal est moins critique.

Une étude approfondie réalisée en Suède a déterminé qu'il faudrait abaisser principalement les coûts de construction pour mieux rentabiliser les réseaux de chauffage urbain dans les secteurs à basse densité de demande thermique. Cette même étude propose diverses solutions telles l'utilisation de nouvelles méthodes de raccordement ou l'emploi de tuyaux flexibles en plastique (Forsaeus Nilsson et al., 2008).

Au Canada, les tendances sociales ont favorisé l'implantation de maisons individuelles contribuant à une faible densité de demande thermique en général. Cependant, cela n'a pas empêché la communauté amérindienne d'Oujé Bougoumou, dans le nord du Québec de mettre en place un système de chauffage urbain malgré la faible densité de demande thermique (Ressources Naturelles Canada, 2009a). De même, une autre étude scientifique a permis de confirmer la

rentabilité d'un réseau de chauffage urbain alimenté par une usine papetière dans un petit village du Québec avec des subventions couvrant 15% des coûts du projet (Marinova et al., 2008).

2.1.6 Les réseaux alimentés par des usines

La littérature contient encore peu d'exemples de ce type de coopération. La majorité des cas recensés se situent en Europe et en sont encore à l'état expérimental. En 2003, parmi les pays membre de l'union Européenne, seuls la Suède et le Danemark utilisent une quantité non négligeable d'énergie provenant d'usines pour alimenter des réseaux de chauffage urbains. (Werner, 2006). Toutefois, cela n'empêche pas qu'un des exemples les plus cités soit situé à Vienne (Autriche) où 8% de la chaleur distribuée dans le réseau de la ville provient de source industrielle, en particulier de la raffinerie OMV (Euroheat & Power, 2006). En Suède, la compagnie de papier Stora Enso alimente aussi un réseau de chauffage urbain à partir d'une de ses usines à Nymölla. Des études ont été réalisées afin de déterminer s'il était préférable d'utiliser cette chaleur pour des besoins internes à l'usine ou s'il valait mieux la vendre pour chauffer les immeubles (Svensson et al., 2008; Jönsson et al., 2008). Dans une étude semblable, des scientifiques ont déterminé quel degré de participation devrait avoir une usine papetière dans la gestion d'un réseau de chauffage urbain avec la ville (Gebremedhin, 2003). Cette étude est basée sur deux usines situées à Borlänge et Falun, en Suède, qui participent déjà modestement aux réseaux de chauffage urbain municipaux. Un autre groupe de recherche en Suède a aussi développé un modèle pour calculer quels types d'échanges devraient être réalisés entre une usine papetière, une scierie, une ville et une usine de biocarburant (Karlsson & Wolf, 2007).

2.1.7 Les principales associations

Des associations ont été formées dans le but de promouvoir les réseaux de chaleur et de froid urbain. Ces associations sont composées principalement des opérateurs de réseaux, de représentants du gouvernement, de constructeurs de réseaux, de fournisseurs de pièces et de chercheurs dans le domaine. Elles facilitent le développement des technologies et l'échange d'information entre les membres tout en mettant de l'avant les avantages économiques et environnementaux auprès du public. La principale association au Canada est le Canadian District Energy Association (CDEA). International District Energy Association (IDEA) concentre ses

efforts aux États-Unis, mais comptent aussi des membres canadiens. Sur le continent européen, EuroHeat & Power est la principale association du même genre.

2.1.8 Les études de faisabilité

Malgré la longue durée et le coût élevé de ces études, elles sont nécessaires pour justifier les investissements d'implantation de réseaux de chauffage urbain. Alao (2007) et Marinova et al.(2008) ont détaillé les principales étapes d'une méthode qui sert de base aux calculs de ce mémoire. La figure 6 résume les principales étapes de cette méthode : évaluation des coûts de remplacement des anciens systèmes de chauffage, évaluation de la demande de chaleur, évaluation des coûts d'implantation.

Dans un premier temps, les principaux types de chauffage utilisés sont répertoriés. Pour chacun, les coûts de remplacement sont évalués en se basant sur des modèles représentatifs d'un bâtiment type. À partir du nombre total de bâtiments, ces coûts sont ramenés à l'échelle de la zone d'étude en se basant sur des proportions des différents types de chauffage. Dans le cas de Alao (2007), les types de chauffage ont été obtenus à partir d'un rapport local des pompiers ainsi que qu'une évaluation visuelle des bâtiments. À plus grande échelle, il est possible de sonder seulement un échantillon de bâtiments et d'appliquer les proportions obtenues à la zone étudiée (P. Blain, communication personnelle, 2009).

La seconde étape consiste à déterminer la demande de chaleur des clients. Deux types de demande doivent être déterminés : la demande cumulative annuelle et la demande de pointe. La première est constituée de toute l'énergie consommée durant une année par tous les clients ainsi que des pertes de chaleur dans le réseau. Il s'agit d'une valeur clé dans l'étude de faisabilité puisqu'elle permet de déterminer le prix de vente de la chaleur et les profits. La deuxième est la puissance maximale requise par le réseau à un moment donné.

Plusieurs méthodes existent pour déterminer la demande cumulative annuelle et les principales sont présentées à la section 2.2 de ce document. Parmi celles-ci, Alao (2007) a opté pour une méthode basée sur les valeurs de la demande thermique des bâtiments fournies par plusieurs gouvernements comme c'est le cas pour la Canada, la Chine, les États-Unis et le Royaume-Uni (RNCan, 2009b; National Bureau of Statistics of China, 2005; Energy Information Administration, 2006; Department for Business Enterprise & Regulatory Reform, 2007; Swan &

Ugursal, 2009). Celles-ci sont calculées à partir des données globales de production et de consommation d'énergie à l'intérieur des pays et de modèles mathématiques répartissant l'énergie parmi les diverses utilisations possibles. Elles permettent donc d'obtenir la quantité de chaleur consommée selon le type de bâtiment résidentiel (maison unifamiliale séparée, maison unifamiliale attenante, appartement, maison mobile) et l'année de construction en multipliant par leur surface. Pour ses travaux, Alao (2007) a acquis ces informations du rôle d'évaluation municipal.

Pour obtenir la demande de pointe Alao (2007) s'est basée sur une étude réalisée par Hydro-Québec (2006). La méthode consiste à diviser la consommation annuelle de chaleur des clients proportionnellement à la somme des degrés-jours de chaque mois. Ces derniers sont déterminés en calculant, pour chaque jour, la différence entre la moyenne de température et un seuil donné, généralement 18°C (McQuiston et al., 2005). Le nombre de degrés-jours est proportionnel à la quantité de chauffage nécessaire dans une journée ce qui explique qu'ils soient utilisés pour calculer la demande mensuelle de chauffage. Il s'agit ensuite de diviser la quantité d'énergie estimée pour chaque mois par le nombre de jours pour obtenir une puissance moyenne mensuelle. La puissance la plus élevée donne une estimation de la charge de pointe du réseau.

La troisième étape de l'étude de faisabilité est basée sur les deux demandes qui ont été calculées à l'étape précédente. Une configuration de réseau optimale est déterminée pour distribuer la chaleur. Ce choix influence directement le temps de retour sur investissement du réseau. De plus, la puissance qui doit être fournie par la chaudière centrale est calculée à cette étape (Alao, 2007).

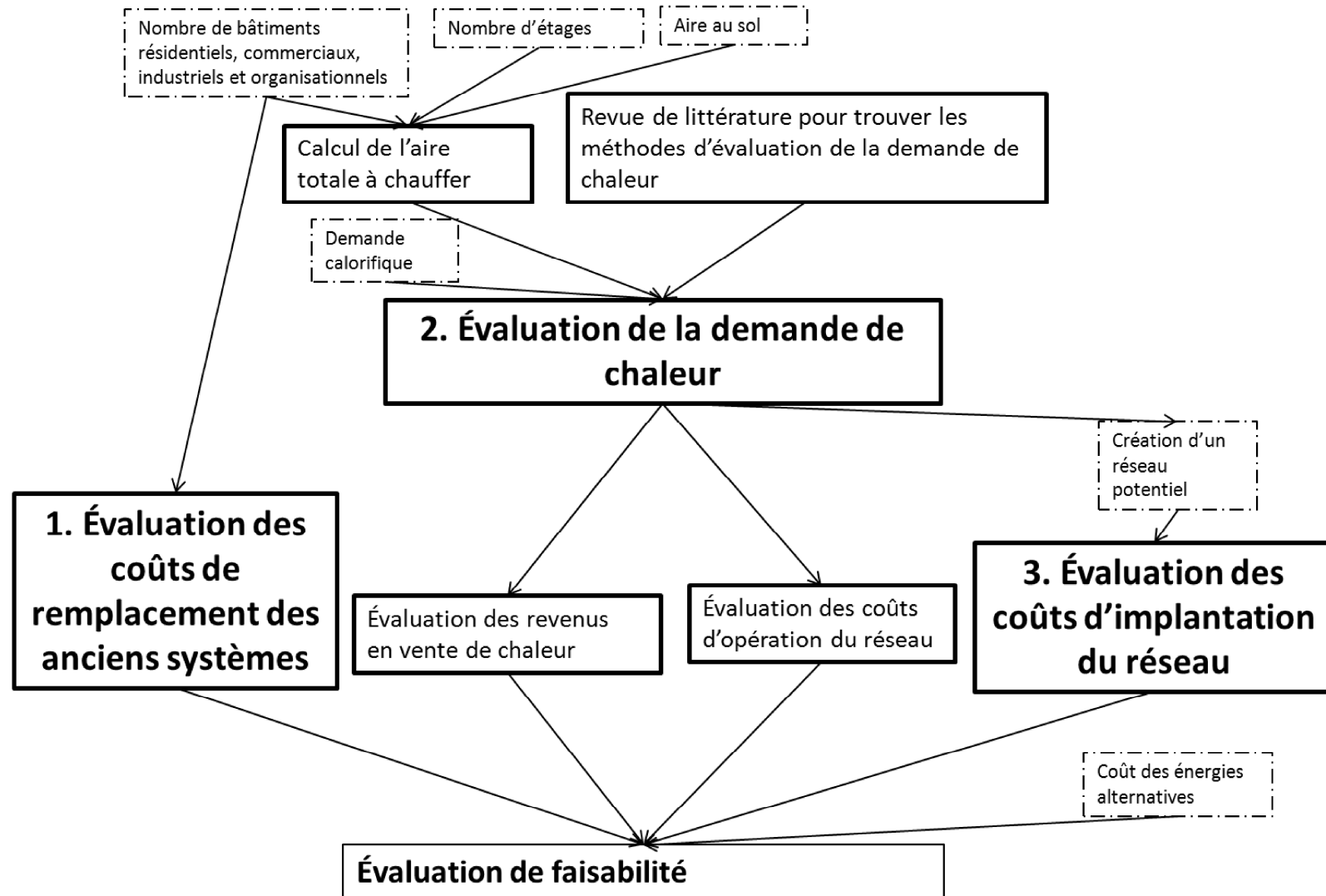


Figure 6 : Schéma des principales étapes d'une étude de faisabilité de l'implantation d'un réseau de chauffage urbain.

2.2 Les méthodes d'évaluation de la demande de chaleur

2.2.1 Les méthodes d'ingénierie traditionnelles

McQuiston et al. (2005), ASHRAE (2008) et Alao (2007) ont détaillé les principales méthodes de simulation et d'évaluation de la charge thermique des bâtiments utilisées par les ingénieurs, soit : degré-jour, BIN, simulation globale et autres outils de calcul d'énergie. Toutefois, ces méthodes sont généralement utilisées pour l'étude de bâtiments individuels. Elles exigent donc des informations détaillées sur les matériaux de construction ainsi que sur l'occupation des bâtiments. Puisque l'objectif de ce travail est d'analyser la demande de plusieurs centaines de bâtiments, ces méthodes n'y sont pas détaillées.

2.2.2 Les modèles d'évaluation de charge thermique des groupes de bâtiments

Pour répondre à de nouveaux besoins d'évaluation de la demande énergétique de groupes de bâtiments, incluant la charge thermique, des modèles ont été construits. Swan & Ugursal (2009) ont décrit les principales méthodes qui existent. En se basant sur la source des données, les méthodes sont divisées en deux catégories : les approches ascendantes et les approches descendantes.

2.2.2.1 Approches ascendantes

Les méthodes classées dans cette catégorie utilisent des données provenant de bâtiments individuels ou, au plus, de groupes de bâtiments, sans s'étendre à un quartier complet, et extrapolent pour obtenir la consommation à grande échelle. Ces méthodes sont classées en deux sous-catégories : les méthodes statistiques et les méthodes d'ingénierie. Les premières se basent sur des données statistiques comme les informations de facturation des fournisseurs d'énergie et la météo, ainsi que différentes techniques de régression, d'analyse de la demande et réseaux de neurones pour déterminer la consommation de chaleur. Les techniques d'ingénieries se basent plutôt sur les méthodes présentées à la section 2.2.1 pour déterminer la demande d'un échantillon de bâtiments ou pour déterminer la demande de bâtiments types. Celles-ci sont multipliées par le nombre de bâtiments du secteur étudié pour obtenir la consommation totale. Ce type d'approche donne des résultats assez précis avec un nombre de données relativement restreints, mais très

précises et difficiles à obtenir. De plus, des analyses poussées peuvent être requises dans certains cas (Swan & Ugursal, 2009).

2.2.2.2 Approches descendantes

Les approches descendantes se basent sur des indicateurs macroéconomiques ainsi que sur des grandes tendances de consommation énergétique pour estimer la variation de la demande énergétique de bâtiments. Ce type d'approche est généralement moins précis que les approches ascendantes et elles ne tiennent pas compte de grand changement comme les crises énergétiques. Cependant, elles fournissent de bonnes approximations avec des données facilement accessibles. La plupart des gouvernements calculent des indicateurs qui donnent une estimation de la consommation brute d'énergie par bâtiments. Quelques exemples de ces pays sont le Canada, les États-Unis, la Chine et les Royaumes Unis (RNCAN, 2009b; Energy Information Administration, 2006; Department for Business Enterprise & Regulatory Reform, 2007; National Bureau of Statistics of China, 2005; Swan & Ugursal, 2009).

2.3 Conclusion

Les bénéfices environnementaux du chauffage urbain ne sont plus à prouver. L'aspect économique a aussi intéressé plusieurs compagnies à investir dans l'installation de réseaux principalement en Europe. À l'opposé, dans le nord de l'Amérique, le coût des carburants moins élevé a favorisé l'implantation de systèmes de chauffage individuels. La hausse vertigineuse des coûts énergétiques des dernières années et les impacts néfastes de l'augmentation des gaz à effet de serre sur l'environnement changent cette tendance générale. Grâce à leur meilleure efficacité, les réseaux de chauffage urbain semblent une solution durable.

L'étalement urbain présente cependant un obstacle à l'implantation de ces réseaux. Lorsque les bâtiments sont trop éloignés, les coûts d'installation et les infrastructures nécessaires peuvent annuler les bénéfices économiques et environnementaux. Des études doivent donc être réalisées pour s'assurer de la faisabilité des projets envisagés. Cependant, comme le montre les travaux de Alao (2007) et Marinova et al. (2008), la durée de ces études et les données requises sont très importantes.

CHAPITRE 3 CHARGE THERMIQUE DES ÉDIFICES RÉSIDENTIELS

Dans un premier temps, ce chapitre décrit les différentes parties de la méthodologie générale : données requises, identification des variables ainsi que calculs et manipulations. Par la suite, les trois études de cas sur lesquelles la méthodologie est appliquée sont présentées suivi d'une description des sources de données ainsi que les outils utilisés pour la mise en œuvre. Ce chapitre se termine avec une analyse des résultats obtenus au cours de la mise en œuvre.

3.1 Méthodologie

3.1.1 Données requises

Pour calculer la charge thermique des bâtiments résidentiels, la méthode proposée utilise les données suivantes, généralement aisément disponibles aux chercheurs :

- Informations du recensement général sur les édifices résidentiels disponibles pour de petites zones géographiques : ces données servent à déterminer le nombre de bâtiments, leur année de construction ainsi que leur type (maison unifamiliale détachée, maison unifamiliale attenante, appartement, maison mobile)
- Couches²d'un Système d'Information Géographique (SIG) : elles permettent de combiner les données du recensement aux zones géographiques associées. Pour ce travail, les couches situant les aires de diffusion et les usines sont essentielles. Cependant, les couches représentant le réseau routier et le réseau hydrographique peuvent aussi aider à orienter l'étude de la demande de chaleur. Par exemple, il est utile de savoir qu'une rivière traverse une ville pour éviter de la faire croiser le réseau de chauffage. D'autres couches peuvent être construites selon les besoins d'analyse.
- Photographies aériennes des zones étudiées : elles sont utilisées pour dénombrer et mesurer l'aire des bâtiments.

² Dans un SIG, les couches sont les structures de données qui permettent de rassembler tous les objets similaires. Par exemple, une couche d'aires de diffusion rassemble toutes les aires de diffusion étudiées.

- Moyenne des aires de bâtiments et valeurs de besoins thermiques publiées par les gouvernements pour des zones à plus ou moins grande échelle. Les deuxièmes sont généralement données en fonction de l'année de construction des bâtiments ainsi que leur type. Une méthodologie basée sur ces données a été retenue pour des raisons de simplicité étant donné que la nouveauté de la méthodologie se situe surtout dans la collecte de données. De plus, ce choix permet de faire une comparaison directe des résultats obtenus avec ceux de Marinova et al. (2008) étant qu'ils ont utilisé la même méthode.
- Vérifications ponctuelles sur place, ou sur des applications telles que Google Streetview©, dans le but d'établir une moyenne du nombre d'étages des édifices dans la zone étudiée. Ces vérifications servent aussi à déterminer le nombre d'immeubles commerciaux et institutionnels.

La même information peut provenir de deux sources différentes, mais en suivant des logiques distinctes. Par exemple, le nombre de bâtiments peut être obtenu en utilisant les informations du recensement ou par dénombrement sur la photo aérienne. La même situation est aussi rencontrée pour l'aire des bâtiments qui peut être mesurée sur la photo aérienne ou à partir de moyennes fournies par le gouvernement. La méthodologie développée tire donc avantage de ces dédoublements en calculant la consommation de chaleur de quatre manières différentes. Les quatre procédures proposées (C1, C2, C3 et C4) sont schématisées à la figure 7 et décrites dans les sections suivantes.

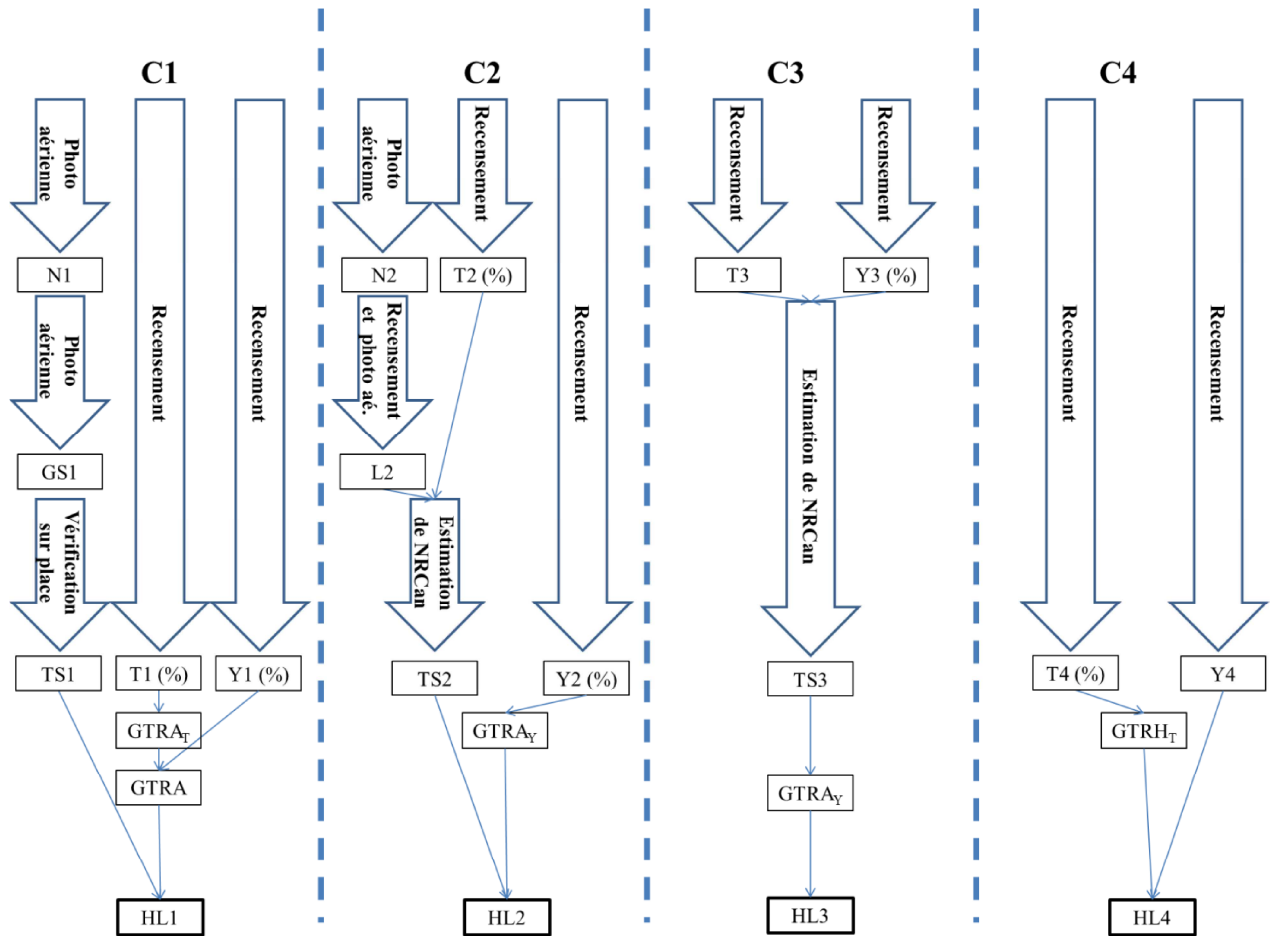


Figure 7 : Diagramme de la méthode proposée

3.1.2 Identification des variables

L'obtention de ces variables est expliquée ci-après, pour chacune des procédures.

- x : dans tous les cas, prend des valeurs entre 1 et 4 et représentant le numéro de la procédure de calcul.
- C_x : variables représentant les différentes procédures de calculs
- N_x : nombre d'immeubles
- GS_x : aire au sol des bâtiments (en m^2)

- L_x : nombre de logis³
- TS_x : aire totale des bâtiments (incluant l'aire des étages) (en m^2)
- T_x : types de bâtiment (maison unifamiliale détachée, maison unifamiliale attenante, appartement, maison mobile)
- Y_x : années de construction des bâtiments
- $GTRA_y$: valeurs de demande thermique par aire de bâtiments. La présence de l'indice y indique la valeur a été modulée en fonction du type (T) ou de l'année de construction (Y) (en GJ/m^2).
- $GTRH_y$: valeurs de demande thermique par nombre de logisLa présence de l'indice y indique la valeur a été modulée en fonction du type (T) ou de l'année de construction (Y) (en GJ/m^2).
- HL_x : charge thermique totale (en GJ)

Note : dans tous les cas, (%) indique que les valeurs sont fournies en pourcentage. Autrement, il s'agit de valeurs absolues.

3.1.3 Calculs et manipulations

3.1.3.1 Procédure de calcul C1

C1 est la procédure de calculs qui utilise le plus de données spécifiques au cas, mais il s'agit aussi de la plus longue. Dans un premier temps, lorsque les villes étudiées sont plus grandes, il faut regrouper les différentes aires de diffusion en se basant sur les similitudes entre les types de bâtiments. Par exemple, toutes les aires qui ont plus de 80% de maisons unifamiliales forment un groupe ayant une dominance de ce type de bâtiment. Les groupes formés diffèrent d'une ville à l'autre étant donné les grandes variations observées. Cette étape sert à uniformiser les surfaces de bâtiments à l'intérieur des groupes ce qui améliore la représentativité de la moyenne calculée à l'étape 2.

³ Un logis correspond à une aire d'habitation de n'importe quelle type (maisons unifamiliales, jumelés, maisons mobiles, appartements).

Pour obtenir l'aire totale à chauffer dans un bâtiment, il faut multiplier la surface au sol par le nombre d'étages, dont une moyenne est calculée à l'étape 3 pour chaque groupe de bâtiments. L'aire totale est ensuite multipliée par la valeur des besoins thermiques. Toutefois, puisque cette valeur est fournie en fonction du type et des années de construction des bâtiments, il faut, au préalable, l'avoir multipliée par ces données tirées du recensement de Statistiques Canada pour chaque aire de diffusion.

3.1.3.1.1 Procédure détaillée

1. N1 est obtenu par dénombrement sur la photo aérienne
2. GS1 est obtenu en multipliant l'aire moyenne des bâtiments par N1. L'aire moyenne des bâtiments est calculée d'un échantillon de bâtiments mesurés sur la photo aérienne. Pour les petites municipalités, une seule aire moyenne est calculée en supposant une certaine uniformité des bâtiments. Pour les plus grandes villes, étant donné les plus grandes variations dans les types d'habitation, des groupes d'aires de diffusion ayant des types semblables peuvent être formés. Une moyenne d'aire d'immeubles est alors calculée par groupe permettant ainsi une meilleure représentativité.

Une attention particulière doit être portée à la présence de garages et d'abris auto adjacents aux maisons. La mesure des bâtiments, réalisée sur une photo aérienne, ne permet pas de les discerner. Pour cette raison, une estimation du nombre de garages est réalisée en comptant sur place ou à partir de l'application Google Streetview®, pour chaque groupe d'aires de diffusion. Cette estimation est multipliée par une aire moyenne de garage, pour être ensuite retirée de l'aire totale mesurée.

3. TS1 est obtenu en multipliant le nombre d'étage moyen par GS1. Le nombre d'étages moyen des immeubles est calculé de manière similaire à l'aire moyenne des bâtiments, à l'exception qui est compté sur place ou sur l'application Google Streetview®.
4. T1(%) est calculé directement à partir des informations du recensement.
5. Y1(%) est calculé directement à partir des informations du recensement.
6. $GTRA_T$ est obtenu en multipliant les valeurs de la demande thermique fournies par T1(%) pour obtenir des valeurs qui varient en fonction de l'année de construction des bâtiments.

$$7. \text{ GTRA} = \text{GTRA}_T * Y1(\%)$$

$$8. \text{ HL1} = \text{TS1} * \text{GTRA}$$

3.1.3.2 Procédure de calcul C2

C2 utilise un peu moins de données spécifiques au cas et nécessite nettement moins de temps de calcul. Les groupes formés pour C1 sont réutilisés pour calculer différents nombres de logis moyen par bâtiment. Ces valeurs sont obtenues en divisant le nombre de logis obtenu du recensement par le nombre de bâtiments calculé sur la photo aérienne, et ce, pour un échantillon d'aires de diffusion pour chaque groupe.

Pour chaque aire de diffusion dont la consommation de chaleur est calculée, le nombre moyen de logis par bâtiment est multiplié par le nombre de bâtiments calculés sur la photo aérienne pour obtenir le nombre de logis. Celui-ci est multiplié par une aire moyenne ainsi que la valeur de la demande thermique fournie par le gouvernement. Comme pour C1, la valeur de la demande thermique doit être modulée par les types et les années de construction des bâtiments tirées du recensement.

3.1.3.2.1 Procédure détaillée

1. $N2 = N1$ est obtenu par dénombrement sur la photo aérienne.
2. $L2$ est obtenu en multipliant $N2$ par le nombre moyen de logis par bâtiment. Celui-ci est calculé pour un échantillon dans un groupe de bâtiments de type uniforme en divisant le nombre de logis par le nombre de bâtiments de l'aire de diffusion. Les groupes formés pour la procédure C1 sont les mêmes que ceux utilisés pour C2.
3. $T2(\%) = T1(\%)$
4. $TS2$ est obtenu en multipliant le nombre d'immeubles différenciés par type ($N2 * T2(\%)$) par des aires moyennes de logement fournies par une le gouvernement.
5. $Y2(\%) = Y1(\%)$
6. GTRA_Y est obtenu en multipliant les valeurs de la demande thermique par $Y2(\%)$ pour obtenir des valeurs qui varient en fonction de l'année de construction des bâtiments.
7. $\text{HL2} = \text{TS2} * \text{GTRA}$

3.1.3.3 Procédure de calcul C3

C3 n'utilise pas les groupes formés pour C1 et C2. Dans ce cas, pour chaque aire de diffusion, les types de bâtiments sont tirés du recensement. Ceux-ci sont multipliés par les pourcentages des années construction aussi tirées du recensement ce qui permet d'obtenir les différents types de bâtiments par année de construction. Ces valeurs sont ensuite multipliées par des aires moyennes de logis, puis par les valeurs de demande thermique, toutes fournies par le gouvernement.

3.1.3.3.1 Procédure détaillée

1. T3 et Y3(%) sont obtenus directement du recensement.
2. TS3 est obtenu en multipliant le nombre d'immeubles différenciés par type ($N3 * T3(\%)$) par des aires moyennes de logement fournies par le gouvernement.
3. $GTRA_Y$ (même valeur que pour C2)
4. $HL3 = TS3 * GTRA_Y$

3.1.3.4 Procédure de calcul C4

C4 est très semblable à C3 à l'exception qu'aucune aire n'est calculée. Les types de logement, différenciés par années de construction, sont multipliés directement par des valeurs de besoins thermiques du gouvernement, différents de ceux utilisées pour les autres procédures.

3.1.3.4.1 Procédure détaillée

1. $T4(\%) = T1(\%)$
2. $GTRH_T$ est obtenu en multipliant les valeurs de demande thermique des bâtiments fournies par le gouvernement en fonction du type de logement par $T4(\%)$.
3. Y4 est obtenu du recensement directement.
4. $HL4 = GTRH * Y4$

3.2 Études de cas

Quatre études de cas ont été réalisées. La première a été utilisée pour valider les résultats fournis par la méthodologie tandis que les trois autres, les cas A, B et C, ont permis de tester

l'application des procédures dans diverses conditions (localisation géographique, nombre, densité et type d'immeubles, disponibilité des données, etc.). Une courte description de chacun de ces cas est donnée dans les paragraphes qui suivent. Certaines caractéristiques majeures sont aussi résumées dans le tableau 6 et le tableau 7 donnent les années de construction des bâtiments. Les figures 8, 9, 10 et 11 présentent les aires de diffusion sur lesquelles la méthodologie a été appliquée. Les aires de diffusion sont les plus petits secteurs pour lesquels les données du recensement de Statistiques Canada sont publiées. Ces zones couvrent un voisinage de quelques coins de rue comptant des populations entre 400 et 700 personnes (Statistiques Canada, 2010).

- Le cas de validation porte sur une ville mono-industrielle construite autour d'une usine de pâte Kraft dans l'est du Canada. La densité d'habitants par kilomètre carré n'est pas trop basse ce qui permet de concentrer l'offre de chauffage urbain à la zone urbaine de la ville. Le type d'habitations est relativement uniforme avec 68% des logis qui sont des maisons unifamiliales, ce qui correspond à environ 90% des bâtiments. Plus de la moitié des bâtiments ont été construits avant l'année 1960, probablement lors de la construction ou d'un agrandissement de l'usine. L'âge des bâtiments est donc aussi relativement uniforme. Les résultats d'une étude de faisabilité concernant l'implantation d'un réseau de chauffage urbain ont déjà été publiés à propos de ce cas (Marinova et al., 2008).
- Le cas A porte sur une ville de taille moyenne, aussi située dans l'est du Canada, dans laquelle plusieurs usines pourraient fournir de la chaleur à faible coût pour la réalisation d'un réseau de chauffage urbain. La densité d'habitants par kilomètre carré est plus élevée que pour la validation, mais ce qui rend le cas d'autant plus intéressant est la grande population et le pourcentage de maisons unifamiliales plus bas que dans le cas de validation. Cependant, cette dernière caractéristique rend l'application de la méthodologie plus difficile puisqu'il faut l'adapter à plusieurs types de bâtiments. Les années de construction des bâtiments sont mieux réparties au fil du temps avec une légère baisse au cours des dernières années. Ce facteur nuit un peu à l'implantation du chauffage urbain étant donné que les bâtiments plus récents consomment moins de chaleur.
- Le cas B traite d'une ville de taille moyenne, située dans l'ouest du Canada, dans laquelle plusieurs usines pourraient fournir de la chaleur à faible coût pour la réalisation d'un réseau de chauffage urbain. Toutefois, l'usine papetière la plus près est située à 2,5

kilomètres des premières concentrations d'habitations du centre-ville, ce qui représente une distance relativement longue pour le transport de chaleur pour le chauffage urbain. Elle a une densité d'habitants par kilomètre carré assez faible à cause des zones de basse densité autour de la ville. Le centre-ville semble cependant offrir un bon potentiel de demande de chaleur pour le chauffage urbain. Le nombre de chambres moyen par logis est plus élevé ce qui signifie que ceux-ci sont plus grands et nécessitent plus d'énergie pour le chauffage. Les habitations ont principalement été construites avant l'année 1960, probablement lors de la construction ou d'agrandissement des usines papetières.

- Comme pour le cas de validation, le cas C porte sur un village mono industriel situé dans l'est du Canada. Cependant, celui-ci est nettement plus petit au point où la rentabilité d'un système de chauffage urbain est sérieusement mise en doute. Cependant, il s'agit d'un cas intéressant pour l'application de la méthodologie. Le pourcentage de maisons unifamiliales plus élevé en facilitera l'application, mais diminue les probabilités de la réussite de l'implantation d'un chauffage urbain. Les habitations ont été construites, pour la grande majorité, entre les années 1960 et 1980, probablement lors de la construction ou de l'agrandissement de l'usine de pâte Kraft.

Pour le cas de validation et le cas C, les études de consommation sont réalisées sur les villes entières étant donné qu'il s'agit de petites municipalités. Pour les cas A et B, des sections de ville regroupant une quinzaine d'aires de diffusions autour des usines papetières ont été étudiées. Les résultats de ces deux derniers cas sont donc disponibles pour chaque aire de diffusion tandis que les autres le sont pour la municipalité entière.

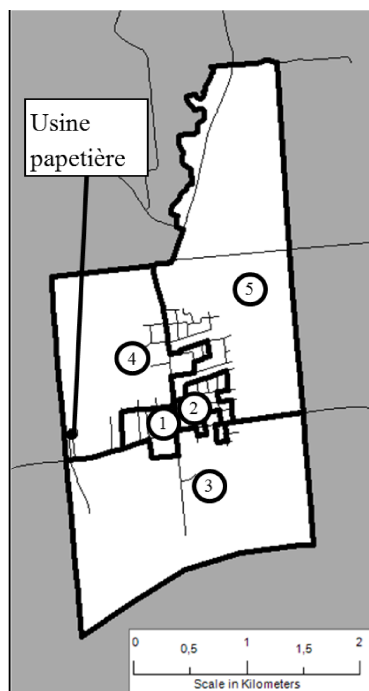


Figure 8 : Aires de diffusions pour le cas de validation.



Figure 9 : Aires de diffusion pour le cas A.

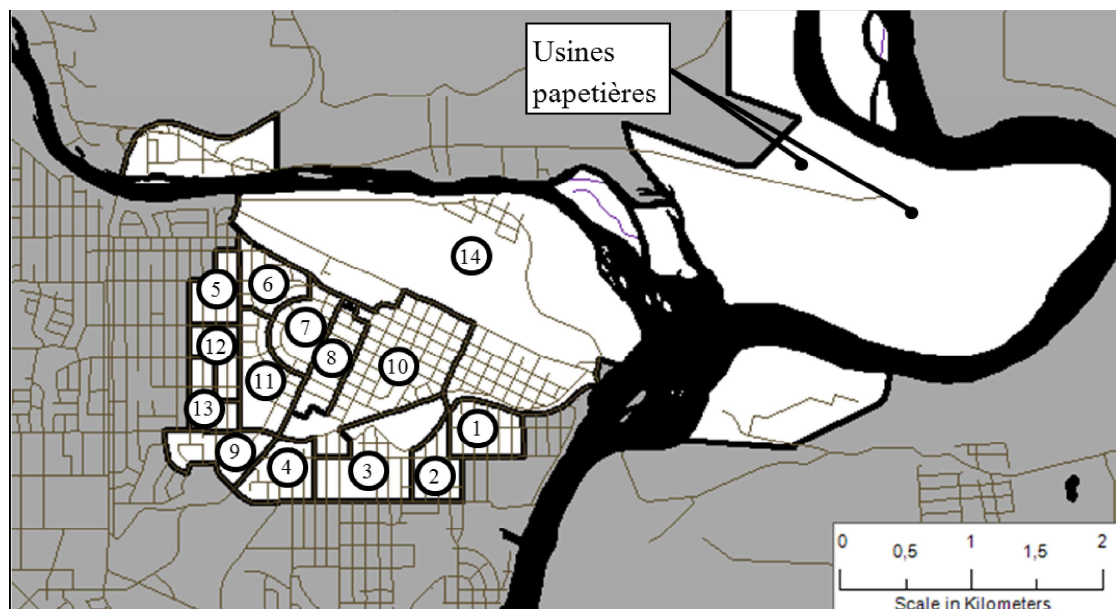


Figure 10 : Aires de diffusion pour le cas B.

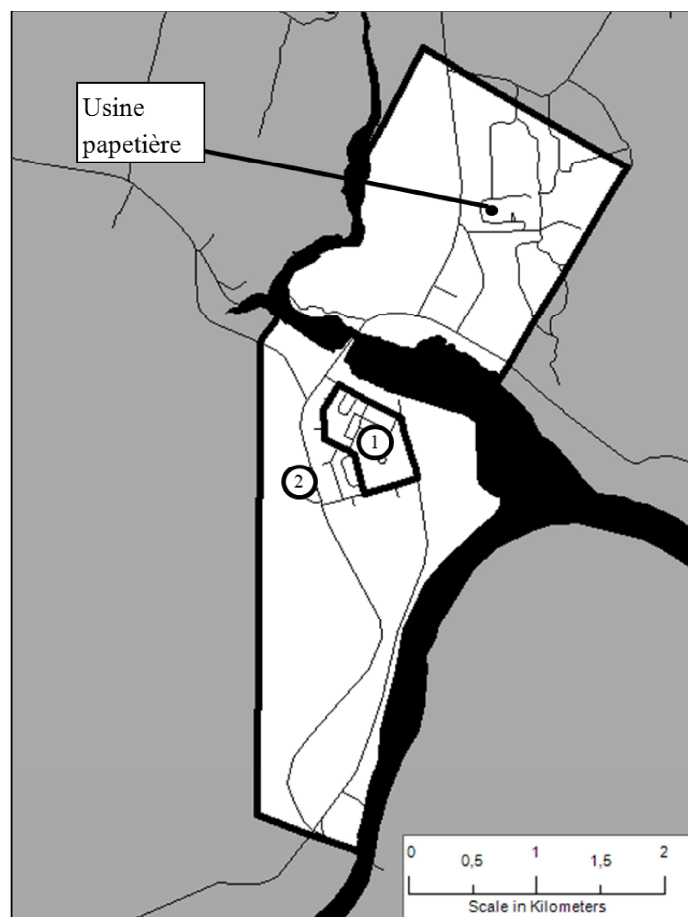


Figure 11 : Aires de diffusion pour le cas C.

Tableau 6 : Diverses statistiques à propos des études de cas.

	Validation	A	B	C
Densité de pop. (hab. /km ²)	365	437,2	229,1	116,3
Nombre d'habitations	980	53470	17 200	400
Population	2300	116000	40 400	980
% de maisons uni familiales ⁴	68	39,4	56,4	76,5
Nombre de chambres moyen par habitation	6,01	6,0	7,00	7,2
Nombre de personnes moyen par ménage	2,3	2,2	2,49	2,4

Tableau 7 : Distribution des années de construction des bâtiments pour les études de cas (en %).

	Validation	A	B	C
Avant 1946	23	12	4	5
1946 à 1960	31	17	14	9
1961 à 1970	13	14	28	26
1971 à 1980	12	20	30	40
1981 à 1985	6	9	7	5
1986 à 1990	7	9	3	5
1991 à 1995	5	8	7	5
1996 à 2000	1	4	5	0
2001 à 2006	2	5	2	6
Total	100	100	100	100

3.2.1 Sources de données

Les sources de données adoptées pour ce travail sont énumérées dans les paragraphes qui suivent :

- Photos aériennes : elles ont été obtenues à partir de l'application Googlemaps© (Google, 2010). Les photos aériennes pour le cas C n'ont pas une définition suffisamment élevée pour permettre l'application de toutes les procédures de calculs de la méthodologie. Pour cette raison, seuls C3 et C4 sont appliqués.
- Vérifications sur place : elles ont été réalisées par l'application Google Streetview© (Google, 2010). Cette application n'est pas disponible pour le C.
- Données du recensement : elles sont tirées du recensement général de la population réalisée par Statistiques Canada en 2006 (CREPUQ, 2006). Ces données sont rendues

⁴ Par rapport au nombre total de logis.

disponibles aux scientifiques grâce à l'Initiative de démocratisation des données (IDD) de Statistiques Canada.

- Couches du SIG : elles sont tirées de la base de données de Statistiques Canada (CREPUQ, 2006). Ces données sont rendues disponibles aux scientifiques grâce à l'Initiative de démocratisation des données (IDD) de Statistiques Canada.
- Valeurs des besoins thermiques⁵ et estimations des aires de bâtiment : elles ont été obtenues de Ressources Naturelles Canada (2009b).

3.2.2 Outils

Microsoft Office Excel : ce logiciel informatique est un tableur largement utilisé dans la communauté scientifique. Il a permis de réaliser les calculs ainsi que colliger et analyser les données récoltées.

MapWindow : il s'agit d'un logiciel informatique gratuit à code ouvert de Systèmes d'information géographique (SIG). Les SIG permettent d'associer des données à des éléments positionnés sur des cartes. Ils servent donc à l'analyse géographique de ces données.

Étant donné que certaines fonctions du logiciel ne répondent pas complètement aux besoins, il a été utilisé conjointement avec fGIS qui est présenté plus bas. MapWindow a principalement été utilisé pour ses propriétés d'affichage pour permettre l'analyse des données.

fGIS : il s'agit d'un logiciel informatique de SIG. Il a été développé il y a quelques années à l'Université du Wisconsin principalement pour des applications dans le domaine de la foresterie. Les droits de ce programme ont été vendus mais la version produite le 13 septembre 2005 est encore disponible gratuitement. Ce logiciel a été utilisé pour le traitement et le regroupement des données par aires de diffusion.

Beyond 20/20 : il s'agit d'un logiciel informatique conçu pour visualiser et extraire les données du recensement de Statistiques Canada.

⁵ Disponibles à l'annexe 1.

Googlemaps © : il s'agit d'une application disponible gratuitement sur internet pour la visualisation de cartes et la confection d'itinéraire. Elle a permis d'obtenir les photos aériennes pour les zones étudiées.

Google Streetview © : il s'agit d'une application disponible gratuitement sur internet pour la visualisation directement dans les rues. Cette application est utilisée conjointement avec Googlemaps© afin de d'obtenir des caractéristiques sur les bâtiments qui ne peuvent être déterminées à partir de photos aériennes.

3.2.3 Résultats de la comparaison avec le cas de référence

Tableau 8 : Valeurs des variables pour le cas de référence, procédure C1.

N1	910 bâtiments résidentiels	T1 (%)		Y1 (%)	
GS1	82600 m ²	Maisons individuelles	67	Avant 1946	23
TS1	92600 m ²	Jumelés	5	1946 à 1960	31
HL1	57800 GJ	Maisons en rangées	0	1961 à 1970	13
		App., plain-pied	11	1971 à 1980	12
		App., plus de cinq étages	0	1981 à 1985	6
		App., moins de cinq étages	16	1986 à 1990	7
		Autre logement	1	1991 à 1995	5
		Maisons mobiles	1	1996 à 2000	1
				2001 à 2006	2

Tableau 9 : Valeurs des variables pour le cas de référence, procédure C2.

N2	910 bâtiments résidentiels	T2 (%)		Y2 (%)	
L2	1,06 Logis/ bâtiments	Maisons individuelles	67	Avant 1946	23
TS2	105000 m ²	Jumelés	5	1946 à 1960	31
HL2	69600 GJ	Maisons en rangées	0	1961 à 1970	13
		App., plain-pied	11	1971 à 1980	12
		App., plus de cinq étages	0	1981 à 1985	6
		App., moins de cinq étages	16	1986 à 1990	7
		Autre logement	1	1991 à 1995	5
		Maisons mobiles	1	1996 à 2000	1
				2001 à 2006	2

Tableau 10 : Valeurs des variables pour le cas de référence, procédure C3.

TS3	111000 m ²	T3		Y3 (%)	
HL3	73700 GJ	Maisons individuelles	67	Avant 1946	23
		Jumelés	5	1946 à 1960	31
		Maisons en rangées	0	1961 à 1970	13
		App., plain-pied	11	1971 à 1980	12
		App., plus de cinq étages	0	1981 à 1985	6
		App., moins de cinq étages	16	1986 à 1990	7
		Autre logement	1	1991 à 1995	5
		Maisons mobiles	1	1996 à 2000	1
				2001 à 2006	2

Tableau 11 : Valeurs des variables pour le cas de référence, procédure C4.

HL4	74900 GJ	T4 (%)		Y4	
		Maisons individuelles	67	Avant 1946	225
		Jumelés	5	1946 à 1960	305
		Maisons en rangées	0	1961 à 1970	130
		App., plain-pied	11	1971 à 1980	115
		App., plus de cinq étages	0	1981 à 1985	60
		App., moins de cinq étages	16	1986 à 1990	70
		Autre logement	1	1991 à 1995	50
		Maisons mobiles	1	1996 à 2000	10
				2001 à 2006	20

La figure 12 compare la consommation des immeubles obtenue par Marinova et al. (CR) à celles obtenues avec la nouvelle méthodologie (C1 à C4). L'écart entre CR et les autres valeurs varie entre -10% et 17%. De bonnes estimations ont été obtenues avec les calculs C3 et C4 avec des différences de 15% et 17%. Cependant les meilleurs résultats ont été obtenus avec les calculs C1 et C2 à seulement -10% et 9% respectivement de la valeur de référence. Cette situation peut s'expliquer par le fait que les meilleures valeurs sont basées sur le nombre réels d'immeubles comptés sur l'image. Une différence de seulement 5% a été observée entre le nombre d'immeubles du rôle d'évaluation municipale et celui compté sur la photo aérienne.

L'écart observé entre le nombre d'immeubles de CR ainsi que C1 et C2, n'expliquent cependant pas toute la différence constatée sur la consommation de chaleur. Puisque les mêmes valeurs de demande thermique ont été utilisées que Marinova et al. (2008) et Alao (2007), l'erreur provient donc de l'évaluation de l'âge, de l'aire et du type des bâtiments. Puisque le type de bâtiments est

assez uniforme dans le cas de validation (90% des bâtiments sont des maisons unifamiliales détachées), l'erreur provient donc surtout des deux premiers facteurs. La figure 13 compare les différentes aires calculées, excepté pour C4 où aucune aire n'a été calculée. Pour C1, le faible écart avec CR (1%) montre que la méthode d'évaluation de l'aire est fidèle à la réalité. Pour C2 et C3, les écarts avec CR est à peu près dans le même ordre que celui observé pour la consommation. La figure 14 permet, quant à elle, une comparaison des années de construction utilisées pour la méthode, tirées du recensement 2006 de Statistiques Canada, à celles du rôle d'évaluation municipale 2005. Les quatre premiers intervalles montrent des différences assez importantes d'autant plus que les valeurs de demande thermique varient de plus de 10% entre chaque tranche d'âge. Ces écarts sont probablement dus à erreurs d'interprétation des données : les données du recensement tiennent compte de l'année de construction réelle du bâtiment alors que les données du rôle d'évaluation municipale tiennent du compte du fait que les bâtiments résidentiels ont subi des rénovations majeures dans les années 1960 à 1980. Celles-ci peuvent avoir amélioré l'efficacité énergétique des bâtiments, cependant, aucune information n'a été trouvée à ce sujet. L'utilisation des données du recensement implique donc une surestimation de la demande de chaleur qui est jugée négligeable pour ce mémoire.

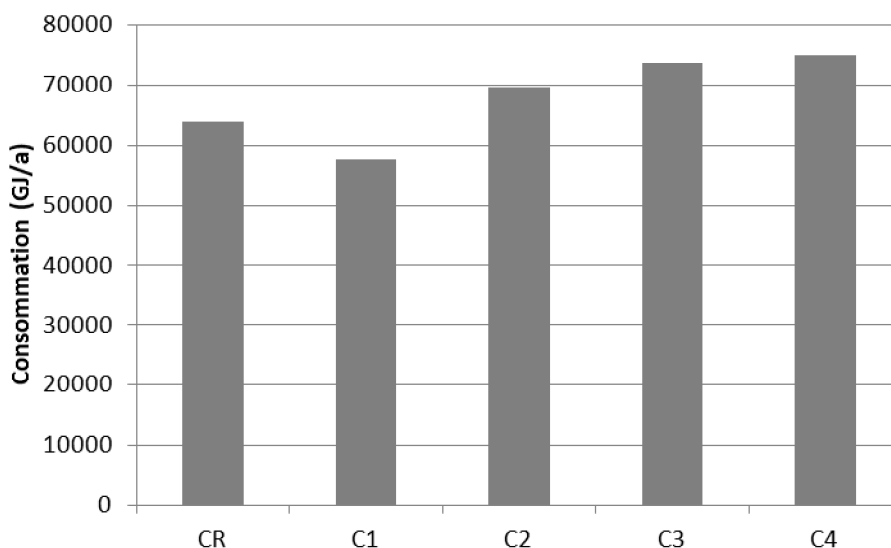


Figure 12 : Consommation de chaleur pour le cas de validation.

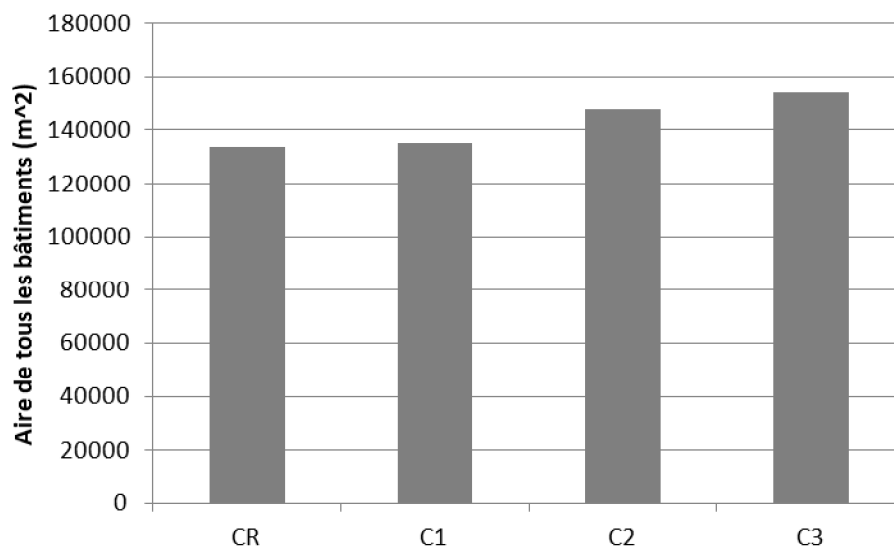


Figure 13 : Surface totale des immeubles pour le cas de validation.

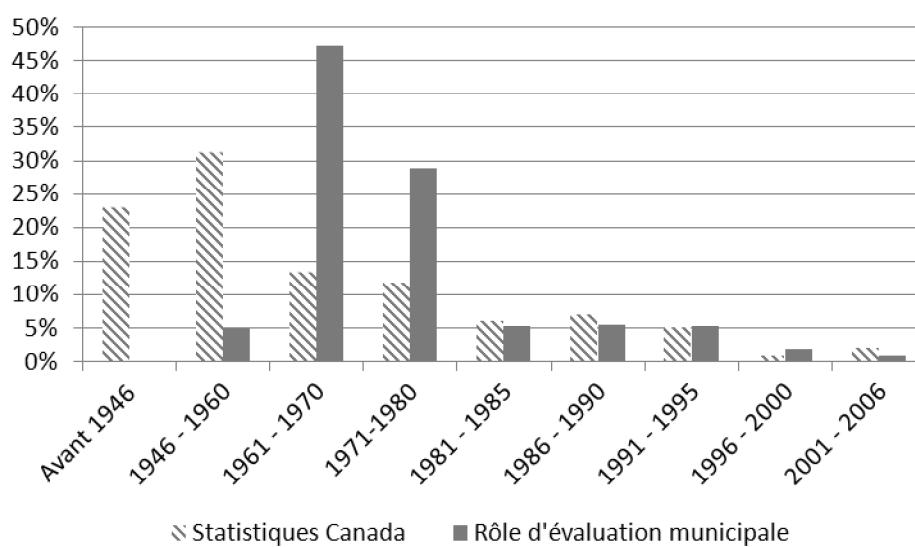


Figure 14 : Comparaison entre les années de construction selon le recensement et selon le rôle d'évaluation municipale.

3.2.4 Résultats de la mise en œuvre

Tableau 12 : Valeurs des variables pour le cas A, procédure C1.

N1	1919 bâtiments résidentiels	T1 (%)		Y1 (%)	
GS1	175000 m ²	Maisons individuelles	26	Avant 1946	36
TS1	433000 m ²	Jumelés	2	1946 à 1960	30
HL1	272000 GJ	Maisons en rangées	1	1961 à 1970	11
		App., plain-pied	28	1971 à 1980	6
		App., plus de cinq étages	3	1981 à 1985	3
		App., moins de cinq étages	40	1986 à 1990	3
		Autre logement	1	1991 à 1995	3
		Maisons mobiles	0	1996 à 2000	3
				2001 à 2006	5

Tableau 13 : Valeurs des variables pour le cas A, procédure C2.

N2	1919 bâtiments résidentiels	T2 (%)		Y2 (%)	
L2	2,47 Logis/ bâtiments	Maisons individuelles	26	Avant 1946	36
TS2	444400 m ²	Jumelés	2	1946 à 1960	30
HL2	274000 GJ	Maisons en rangées	1	1961 à 1970	11
		App., plain-pied	28	1971 à 1980	6
		App., plus de cinq étages	3	1981 à 1985	3
		App., moins de cinq étages	40	1986 à 1990	3
		Autre logement	1	1991 à 1995	3
		Maisons mobiles	0	1996 à 2000	3
				2001 à 2006	5

Tableau 14 : Valeurs des variables pour le cas A, procédure C3.

TS3	385000 m ²	T3		Y3 (%)	
HL3	228 000 GJ	Maisons individuelles	62	Avant 1946	36
		Jumelés	5	1946 à 1960	30
		Maisons en rangées	2	1961 à 1970	11
		App., plain-pied	71	1971 à 1980	6
		App., plus de cinq étages	14	1981 à 1985	3
		App., moins de cinq étages	108	1986 à 1990	3
		Autre logement	2	1991 à 1995	3
		Maisons mobiles	0	1996 à 2000	3
				2001 à 2006	5

Tableau 15 : Valeurs des variables pour le cas A, procédure C4

HL4	227 000 GJ	T4 (%)		Y4	
		Maisons individuelles	26	Avant 1946	88
		Jumelés	2	1946 à 1960	76
		Maisons en rangées	1	1961 à 1970	28
		App., plain-pied	28	1971 à 1980	16
		App., plus de cinq étages	3	1981 à 1985	8
		App., moins de cinq étages	40	1986 à 1990	10
		Autre logement	1	1991 à 1995	10
		Maisons mobiles	0	1996 à 2000	9
				2001 à 2006	17

Tableau 16 : Valeurs des variables pour le cas B, procédure C1.

N1	1741 bâtiments résidentiels	T1 (%)		Y1 (%)	
GS1	215000 m ²	Maisons individuelles	48	Avant 1946	17
TS1	366 000 m ²	Jumelés	5	1946 à 1960	29
HL1	147 000 GJ	Maisons en rangées	4	1961 à 1970	30
		App., plain-pied	8	1971 à 1980	11
		App., plus de cinq étages	2	1981 à 1985	5
		App., moins de cinq étages	32	1986 à 1990	0
		Autre logement	0	1991 à 1995	3
		Maisons mobiles	0	1996 à 2000	2
				2001 à 2006	3

Tableau 17 : Valeurs des variables pour le cas B, procédure C2.

N2	1741 bâtiments résidentiels	T2 (%)		Y2 (%)	
L2	1,71 Logis/ bâtiments	Maisons individuelles	48	Avant 1946	17
TS2	330000 m ²	Jumelés	5	1946 à 1960	29
HL2	135000 GJ	Maisons en rangées	4	1961 à 1970	30
		App., plain-pied	8	1971 à 1980	11
		App., plus de cinq étages	2	1981 à 1985	5
		App., moins de cinq étages	32	1986 à 1990	0
		Autre logement	0	1991 à 1995	3
		Maisons mobiles	0	1996 à 2000	2
				2001 à 2006	3

Tableau 18 : Valeurs des variables pour le cas B, procédure C3.

TS3	352000 m ²	T3		Y3 (%)	
HL3	137000 GJ	Maisons individuelles	90	Avant 1946	17
		Jumelés	11	1946 à 1960	29
		Maisons en rangées	9	1961 à 1970	30
		App., plain-pied	18	1971 à 1980	11
		App., plus de cinq étages	5	1981 à 1985	5
		App., moins de cinq étages	71	1986 à 1990	0
		Autre logement	0	1991 à 1995	3
		Maisons mobiles	0	1996 à 2000	2
				2001 à 2006	3

Tableau 19 : Valeurs des variables pour le cas B, procédure C4.

HL4	143000 GJ	T4 (%)		Y4	
		Maisons individuelles	48	Avant 1946	35
		Jumelés	5	1946 à 1960	59
		Maisons en rangées	4	1961 à 1970	60
		App., plain-pied	8	1971 à 1980	26
		App., plus de cinq étages	2	1981 à 1985	11
		App., moins de cinq étages	32	1986 à 1990	0
		Autre logement	0	1991 à 1995	8
		Maisons mobiles	0	1996 à 2000	5
				2001 à 2006	7

Tableau 20 : Valeurs des variables pour le cas C, procédure C3.

TS3	50600 m ²	T3		Y3 (%)	
HL3	26600 GJ	Maisons individuelles	320	Avant 1946	5
		Jumelés	10	1946 à 1960	9
		Maisons en rangées	0	1961 à 1970	26
		App., plain-pied	0	1971 à 1980	40
		App., plus de cinq étages	0	1981 à 1985	5
		App., moins de cinq étages	45	1986 à 1990	5
		Autre logement	0	1991 à 1995	5
		Maisons mobiles	35	1996 à 2000	0
				2001 à 2006	6

Tableau 21 : Valeurs des variables pour le cas C, procédure C4.

HL4	26700	GJ	T4 (%)		Y4	
			Maisons individuelles	78	Avant 1946	20
			Jumelés	2	1946 à 1960	35
			Maisons en rangées	0	1961 à 1970	105
			App., plain-pied	0	1971 à 1980	165
			App., plus de cinq étages	0	1981 à 1985	20
			App., moins de cinq étages	11	1986 à 1990	20
			Autre logement	0	1991 à 1995	20
			Maisons mobiles	9	1996 à 2000	0
					2001 à 2006	25

Les sommes des valeurs de consommations obtenues sur plusieurs aires de diffusion lors de l'application de la méthodologie pour les cas A, B et C sont présentées respectivement aux figures 15, 16 et 17. Les résultats montrent qu'en regroupant plusieurs aires de diffusion, les quatre calculs donnent des résultats dans le même ordre de grandeur avec un écart d'au plus 20% observé entre les calculs C2 et C4 pour le cas A. Cet écart est tout à fait acceptable dans le cadre d'une étude de pré-faisabilité du chauffage urbain.

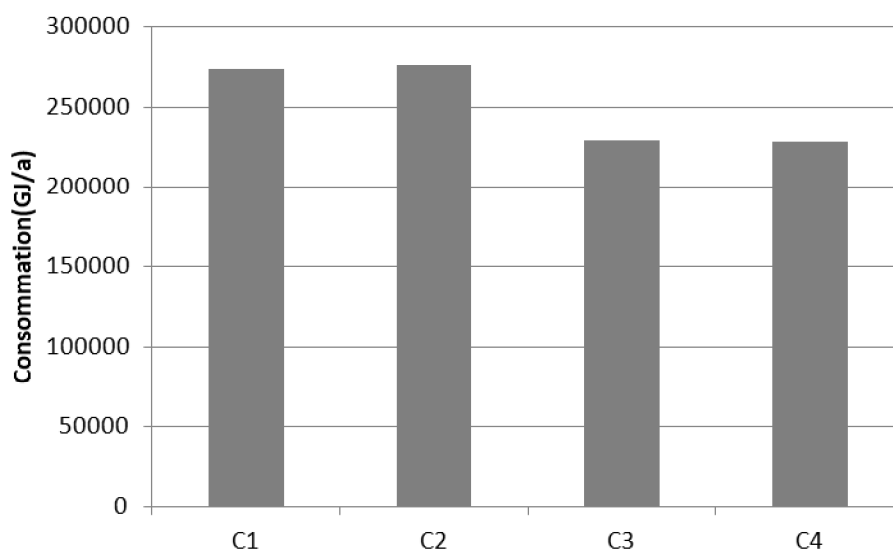


Figure 15 : Consommations obtenues pour le cas A.

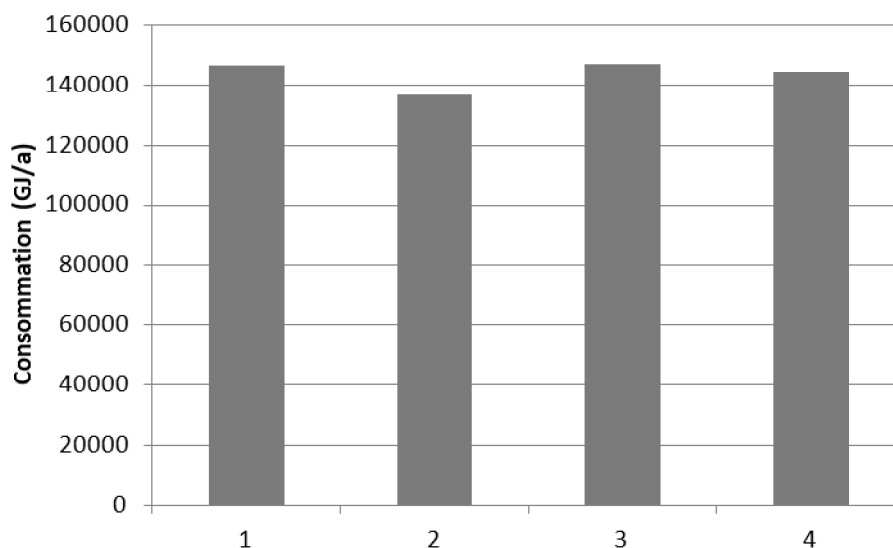


Figure 16 : Consommations obtenues pour le cas B.

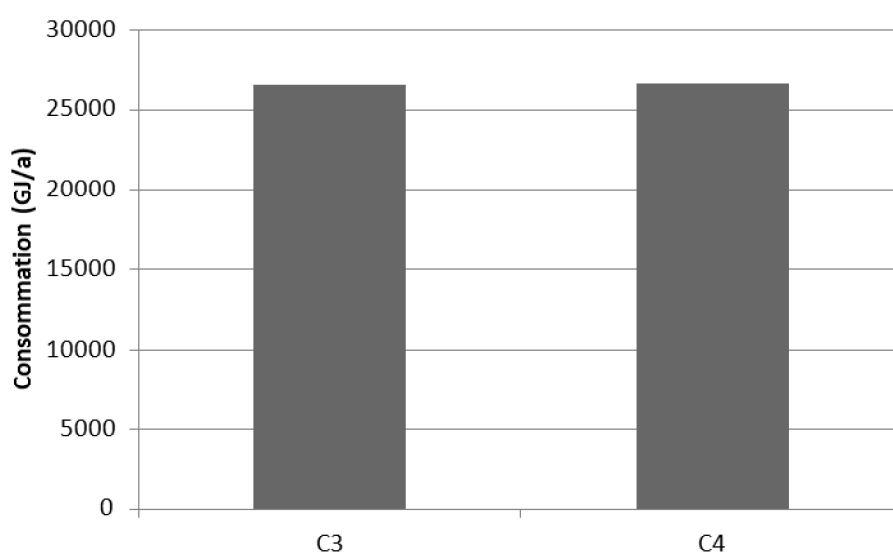


Figure 17 : Consommations obtenues pour le cas C.

Cependant, les figures 18, 19, 20 et 21, détaillant les pourcentages d'écart pour chaque aire de diffusion, montrent que ceux-ci, pris individuellement, sont plus variables. Dans le cas A, les aires 5 et 12 ont des écarts supérieurs à 31 % tandis que dans le cas B, ce sont les aires 2, 6, 10 et 11. La méthodologie semble donc moins stable dans le second cas. En se basant sur l'échantillon d'aires de diffusion retenu, il est difficile de trouver une raison unique pour expliquer ces plus grands écarts, cependant, il semble que les appartements soient beaucoup plus grands que la moyenne nationale. Par exemple, pour l'aire de diffusion 8, qui affiche un écart de 31% entre C1

et C4, l'aire des appartements calculée seulement avec l'image satellite et les vérifications sur Google Streetview © donne un total de 18 200 m², soit environ 146 m²/appartement, comparativement à 11 600 m², soit environ 81 m²/appartement. Quelques justifications sur les écarts pris individuellement sont données ci-dessous :

- Cas A, AD 5 : l'aire de diffusion étudiée est située dans la vieille partie de la ville, où les appartements sont plus petits. Donc les valeurs C3 et C4, basées sur des moyennes nationales, surestiment l'aire, et par conséquent, la demande.
- Cas A, AD 12 : ces écarts peuvent être expliqués par la grande proportion de maisons unifamiliales détachées. En fait, les figures 18 et 19 montrent que la différence entre C1 et C4 ainsi qu'entre C2 et C4 semblent en relation avec le taux de maisons unifamiliales détachées. Cette situation peut être particulière pour le cas A puisque pour le cas de validation, le taux de maisons unifamiliales détachées est élevé, mais la différence relative entre la consommation minimale et maximale obtenue est de 23 %.
- Cas B, AD 2 : selon les données de Statistiques Canada, cette aire de diffusion devrait compter des immeubles d'appartements de plus de cinq étages. Cependant, aucun bâtiment de ce type n'a été recensé visuellement ce qui traduit une certaine erreur d'évaluation du nombre d'étages.
- Cas B, AD 6 : même raison que pour cas B, AD 2.
- Cas B, AD 10 : le nombre de bâtiments, 14, est trop petit ce qui rend l'application des moyennes d'aire pour la ville moins propice à cette aire de diffusion.
- Cas B, AD 11 : il s'agit d'un cas spécial de par sa localisation près de l'hôpital. Les appartements sont donc plus petits et plus condensés.

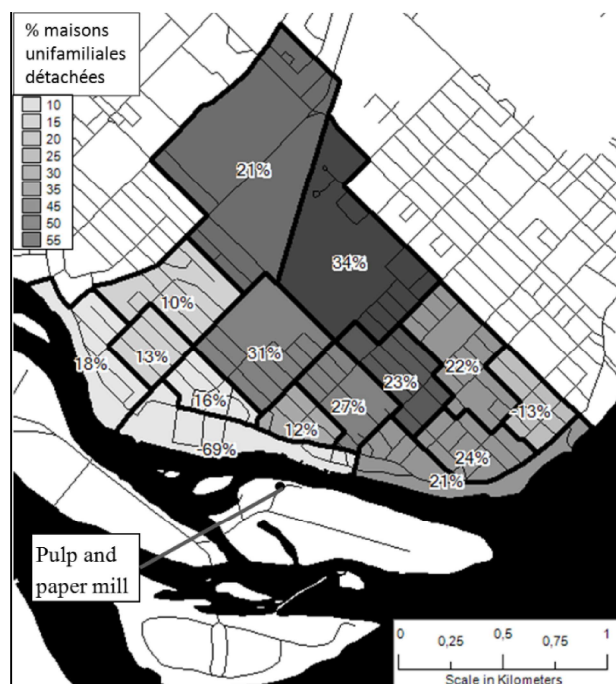


Figure 18 : Pourcentages de différence entre C1 et C4 du cas A.

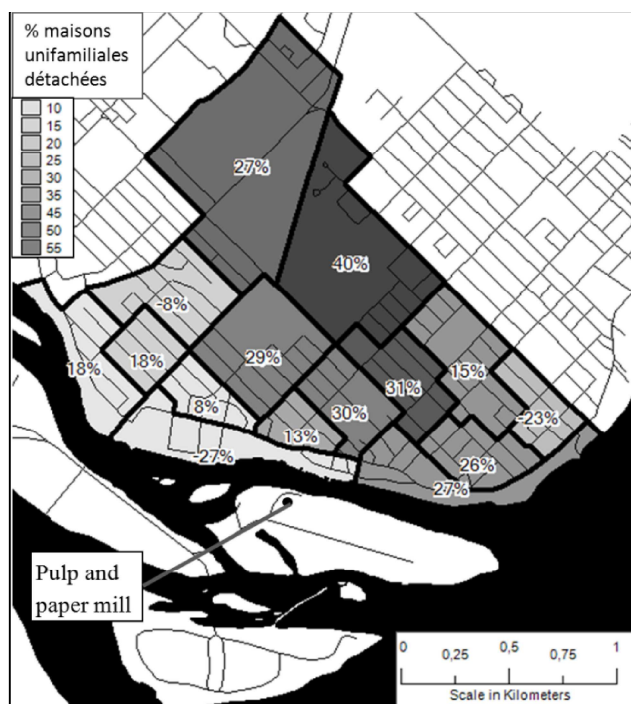


Figure 19 : Pourcentages de différence entre C2 et C4 dans le cas A.

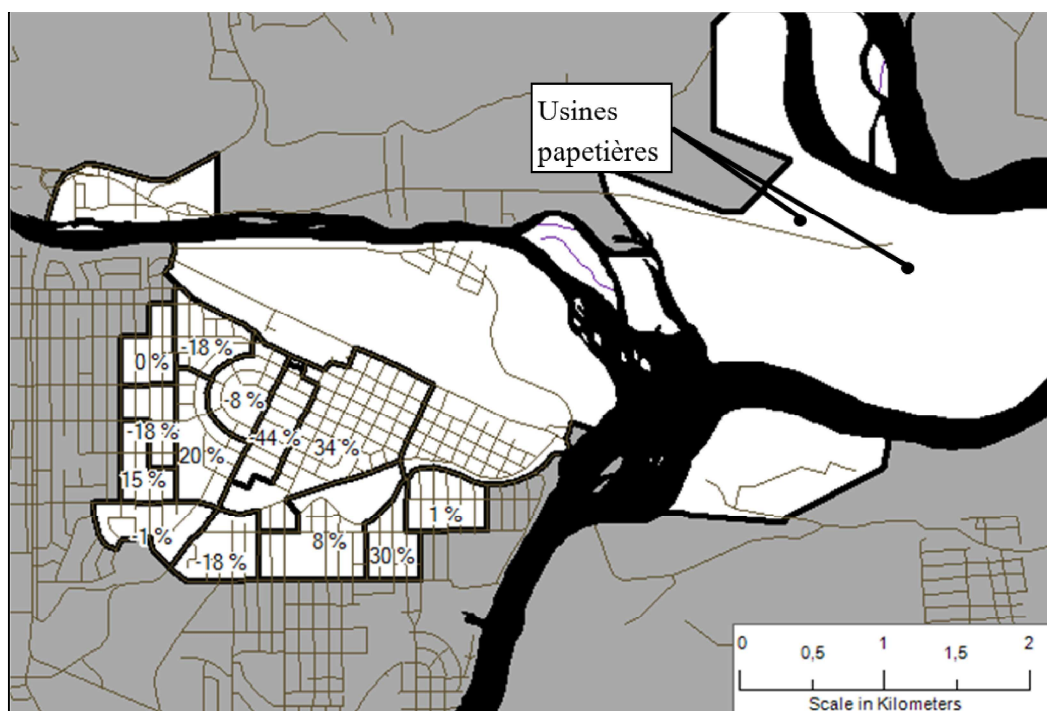


Figure 20 : Pourcentages de différence entre C1 et C4 du cas B.

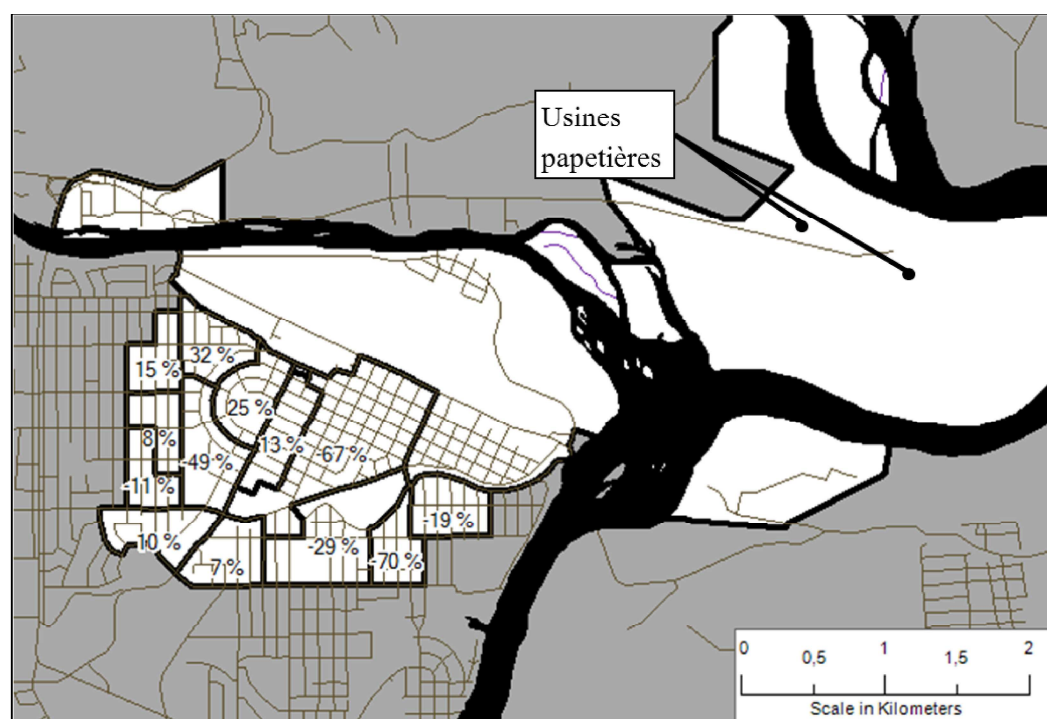


Figure 21 : Pourcentages de différence entre C2 et C4 du cas B.

Concernant le cas C, une difficulté a été rencontrée lors de l'application de la méthodologie puisque la définition des images aériennes n'était pas suffisamment élevée. Par conséquent, seuls

les calculs C3 et C4 ont été exécutés pour ce cas. Comme pour les cas A, B et de validation, ces deux calculs donnent des résultats dans le même ordre de grandeur.

Les résultats obtenus peuvent être classés en deux catégories, ceux obtenus avec les méthodes C1 et C2 et ceux obtenus avec les méthodes C3 et C4. Les écarts observés à l'intérieur du premier groupe oscillent entre -11% et 16% avec une exception à -34% pour l'aire de diffusion 5 de cas A tandis que ceux observés dans le deuxième groupe varient entre -11% et 4%. En considérant que les procédures de calcul C3 et C4 utilisent exactement les mêmes sources de données, provenant du recensement et de RNCan, une analyse a permis de déterminer que cet écart est dû à une application différentes des données. Ainsi, la méthode C3 utilise les valeurs absolues des types de logis et la distribution en pourcentage des années de construction, soit l'opposé de C4 qui utilise les valeurs absolues des années de construction et la distribution en pourcentage des types de bâtiments. Les écarts dans les données de recensement entre les sommes des bâtiments différenciés par type ceux différenciés par années de construction explique donc la différence de résultat entre C3 et C4. Il n'est donc pas nécessaire de réaliser C3 étant donné qu'il est plus compliqué que C4. D'autre part, il a aussi été observé que pour toutes les aires de diffusion, les calculs C3 et C4 obtiennent, en moyenne, à peu près 15 000 GJ par année comme le montre le tableau 22. Cette valeur pourrait donc fournir une approximation globale de la consommation de chaleur des bâtiments résidentiels dans les zones étudiées.

En somme, rien ne porte à croire qu'une des procédures de calculs est meilleure qu'une autre, à l'exception des résultats obtenus dans le cas validation. Toutefois, la validation est un cas d'application précis qui ne représente pas l'entière des conditions qui peuvent être rencontrés comme l'ont prouvé les cas A, B et C. Aucune procédure de calcul précise n'est donc proposée, à moins de pouvoir n'en appliquer qu'une, comme dans le cas C. Dans les situations où tous les calculs peuvent être réalisés, la recommandation est d'utiliser la moyenne des résultats obtenus.

Tableau 22 : Moyenne de consommation par aire de diffusion obtenue avec C3 et C4

	Consommation (GJ)
Validation	18 700
A	15 300
B	11 200
C	13 300

CHAPITRE 4 CHARGE THERMIQUE DES ÉDIFICES COMMERCIAUX ET INSTITUTIONNELS

Étant donné leur utilisation intensive d'énergie, les commerces et les institutions contribuent en grande partie à la rentabilité des réseaux de chauffage urbain. Par exemple, l'étude réalisée par Marinova et al. (2008) et Alao (2007) montre que ces bâtiments, qui représentent 10% du nombre de bâtiments reliés à un réseau dans un village de l'est du Canada, consomment plus de 45% de la chaleur distribuée. Cette section du mémoire propose donc une méthodologie pour l'évaluation de la demande de chaleur pour ce type de bâtiment, afin qu'ils soient inclus dans l'évaluation de la charge thermique globale.

La quantité limitée de données disponibles, le nombre moins élevé de commerces et institutions ainsi que leur consommation plus importante justifient qu'une approche individuelle soit adoptée. Étant donné la charge de travail demandée pour l'application de ce type méthodologie, seulement deux études de cas ont été réalisées : les cas de validation et A présentés à la section 3.2.

4.1 Méthodologie

La méthodologie adoptée repose sur l'utilisation des valeurs des besoins thermiques des bâtiments fournies par les gouvernements. Comme pour le secteur résidentiel, la consommation de chaleur des bâtiments commerciaux et institutionnels s'obtient en multipliant leur surface par la valeur de des besoins thermiques donnée en fonction du type d'activités pratiquée⁶ (voir annexe II). Cependant, contrairement aux valeurs fournies pour le secteur résidentiel, elles ne dépendent pas des années de construction des bâtiments. Malgré la moins grande précision, cette situation a l'avantage de ne pas avoir à trouver l'âge des bâtiments commerciaux et institutionnels. La principale difficulté rencontrée pour cette méthodologie relève plutôt du fait que les données fournies par Statistiques Canada à propos des édifices commerciaux et

⁶ Commerce de gros; commerce de détail; transport et entreposage; industrie de l'information et industrie culturelle; bureaux; services d'enseignement; soins de santé et assistance sociale; arts, spectacles et loisirs; hébergement et services de restauration; autres services.

institutionnels ne sont pas suffisamment détaillées pour les besoins requis. Les nouvelles sources de données adoptées sont donc décrites à la section suivante.

4.1.1 Calculs et manipulations

Pour chaque bâtiment, il s'agit de multiplier l'aire au sol par le nombre d'étages pour obtenir l'aire totale utile. L'aire totale à chauffer est calculée en soustrayant l'aire des garages et des abris d'auto de l'aire totale utile. Le résultat est ensuite multiplié par la demande thermique correspondant au type d'activité pratiquée dans le bâtiment. En se basant sur leur localisation géographique, les commerces et institutions sont regroupés par aire de diffusion comme pour le secteur résidentiel pour permettre une analyse conjointe de la consommation de tous les types de bâtiments.

4.2 Études de cas

4.2.1 Sources de données

Les sources de données adoptées pour ce travail sont énumérées dans les paragraphes qui suivent :

Cas de validation

- Énumération et localisation des bâtiments commerciaux : elles ont été obtenues à partir d'une liste fournie par la municipalité.
- Aire des bâtiments : avec leur localisation trouvée à l'étape précédente, les bâtiments ont été situés sur l'application Googlemaps © et leur aire a été mesurée directement sur la photo aérienne.
- Activités pratiquées dans les bâtiments : elles ont été déduites à partir du nom des commerces fournis sur la liste de la municipalité ainsi que par l'application Google Streetview ©.
- Demande thermique : les valeurs de demande thermique par surface pour chaque type d'activités ont été fournies par Ressources Naturelles Canada pour la province dans laquelle le cas étudié se situe.

- Nombre d'étages du bâtiment : il a été obtenu par observation sur l'application Google Streetview ©.

Cas A

- Énumération et localisation des bâtiments : elles ont été obtenues en arpentant les rues grâce à l'application Google Streetview ©.
- Aire des bâtiments : avec leur localisation trouvée à l'étape précédente, les bâtiments ont été situés sur l'application Googlemaps © et leur aire a été mesurée directement sur la photo aérienne.
- Activités pratiquées dans les bâtiments : les activités pratiquées dans les bâtiments sont déduites à partir de l'application Google Streetview ©.
- Demande thermique : les valeurs de demande thermique par surface pour chaque type d'activités ont été fournies par Ressources Naturelles Canada pour la province dans laquelle le cas étudié se situe.
- Nombre d'étages du bâtiment : il a été obtenu par observation sur l'application Google Streetview©.

Dans certains cas, comme la validation, la collecte de données peut être simplifiée en utilisant, des listes de commerces et d'institutions lorsqu'elles sont disponibles. Elles peuvent être obtenues des chambres de commerce, de certaines institutions gouvernementales ou d'autres organismes semblables. Dans les autres cas, le repérage se fait avec Google Streetview ©.

4.2.2 Résultats et discussions

4.2.2.1 Validation

La figure 22 montre que la consommation obtenue pour le cas de validation avec la méthodologie proposée est inférieure de 7% par rapport à celle obtenue par Marinova et al. (2008). De son côté, la figure 23 montre que la somme des aires obtenue par la méthode est 6% supérieure au résultat obtenu par Marinova et al. (2008). Les écarts obtenus, inférieurs à ceux des bâtiments résidentiels, confirment l'avantage de traiter le secteur commercial individuellement ainsi que la bonne capacité de la méthode à prédire la consommation de chaleur tout en simplifiant la collecte

de données. La principale raison qui explique ces écarts est l'erreur introduite en mesurant sur des images satellites. Ce type d'erreur sera discuté plus en détails dans la section 5.1 de ce mémoire. D'autre part, le fait que Marinova et al. (2008) aient utilisés une demande thermique moyenne alors que celles utilisées pour ce travail ont été différenciées selon le type de bâtiments explique le fait que les écarts sur la consommation et sur l'aire ne soient pas identiques. Il est à noter que la liste fournie par la ville ainsi que les observations faites sur Google Streetview© ont permis de recenser la totalité des commerces énumérés dans le rôle d'évaluation municipale à l'exception de certains bâtiments qui ont été détruits.

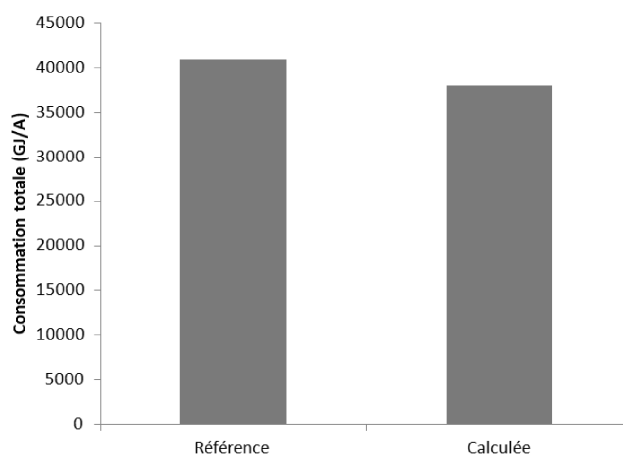


Figure 22 : Consommation des bâtiments commerciaux et institutionnels pour le cas de validation.

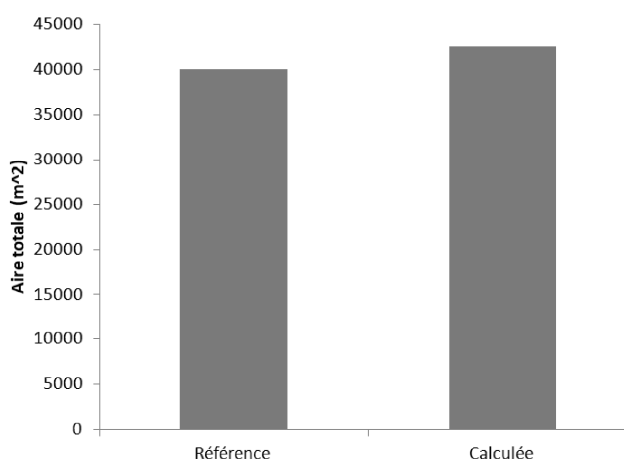


Figure 23 : Aire totale des bâtiments commerciaux et institutionnels pour le cas de validation.

4.2.2.2 Cas A

Les résultats obtenus avec la nouvelle méthodologie sont présentés à la figure 24. Les zones plus foncées, où la consommation de chaleur est plus élevée, sont situées surtout autour des deux artères commerciales qui traversent la zone d'étude. Il serait particulièrement intéressant de diriger le réseau de chauffage urbain vers l'aire de diffusion 1 où la consommation est plus élevée due à la présence d'un centre commercial. À l'opposé le fait qu'il n'y a qu'un seul commerce explique la faible consommation de l'aire de diffusion 4.

Ces observations sont confirmées par la figure 25. D'autre part, cette figure montre aussi que le taux de consommation de chaleur des édifices commerciaux et institutionnels compte pour à peu près 10% à 40% de la consommation totale de la plupart des aires de diffusion. Ces pourcentages sont donc plus bas que celui obtenu pour le cas de validation ce qui implique que le nombre de commerces par habitation est moins élevé et que les commerces sont plus petits.



Figure 24 : Consommation des bâtiments commerciaux et institutionnels du cas A.

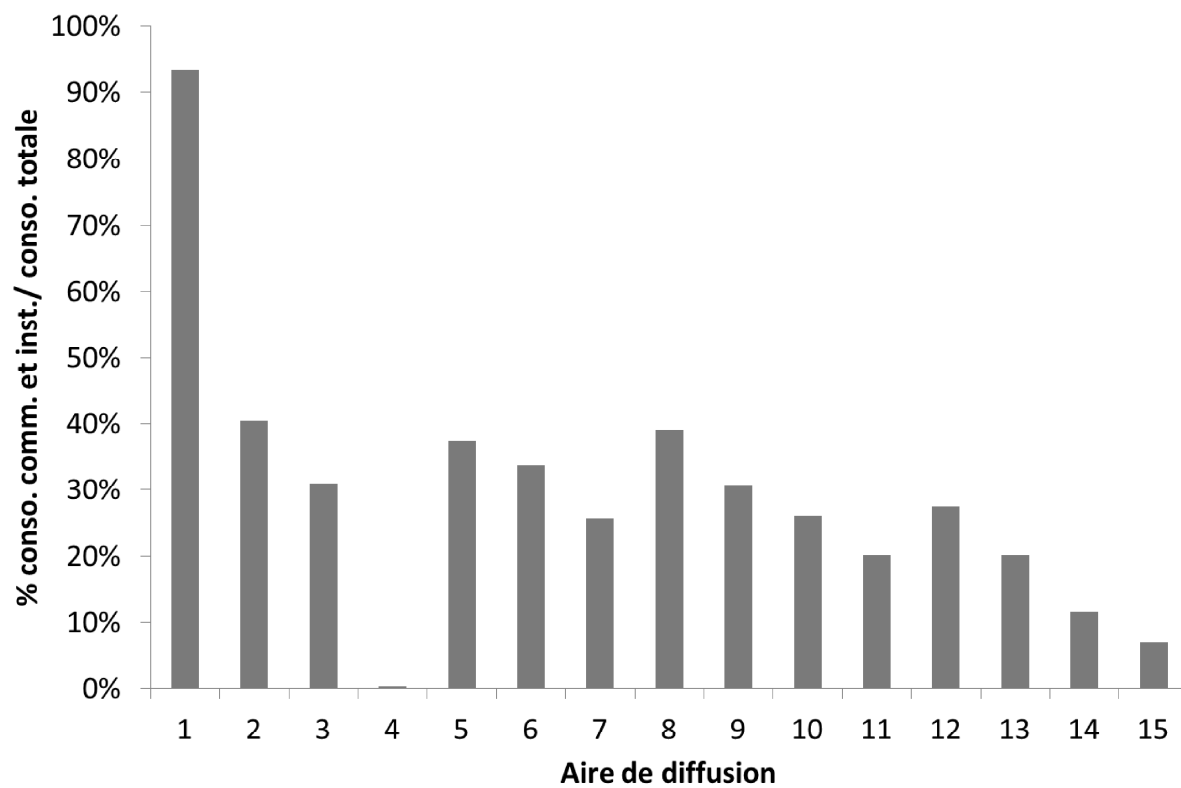


Figure 25 : Rapport de la consommation commerciale et institutionnelle sur la consommation totale.

CHAPITRE 5 DISCUSSION GÉNÉRALE

Cette section présente d'abord quelques sources d'erreur qui ont été recensées autant pour le secteur résidentiel que commercial et institutionnel. L'utilisation potentielle des résultats obtenus par les nouvelles méthodologies est ensuite discutée. Les différentes consommations présentées aux chapitres III et IV sont d'abord reprises et analysées conjointement. Un jugement est porté sur la rentabilité des études de cas en regard des seuils proposés dans la revue de littérature. Par la suite, l'intégration des résultats aux études de faisabilité du chauffage urbain est discutée brièvement. Il est à noter que pour ce chapitre, au lieu de comparer à chaque fois, les résultats obtenus par les calculs C1, C2 et C4, une moyenne de ces trois calculs a été utilisée.

5.1 Sources d'erreurs

Pour la nouvelle méthodologie, les sources d'erreurs suivantes ont été identifiées :

- Erreurs de perception et d'interprétation : des photographies aériennes de haute définition sont accessibles pour un nombre croissant d'emplacements. L'erreur de mesure varie selon la définition de la photo. Dans les cas étudiés, elle oscille entre 0,5 mètre et 1,5 mètre, ce qui correspond à un écart de 10 à 20% par rapport à la mesure réelle. Cependant, le fait qu'elles soient prises depuis des avions crée aussi un problème de perception des distances qui dépend de l'angle dans lequel la photo a été prise. De plus, certains obstacles tels que des arbres ou des ombres peuvent interférer avec le bon discernement des toits des bâtiments. Puis, certains immeubles tels que des entrepôts ou des remises peuvent ne pas être chauffés. Ces erreurs se traduisent donc par des erreurs de mesure sur les aires des bâtiments. Par exemple, dans le cas de validation, ces erreurs ont résulté en une surestimation de 16% de l'aire moyenne des édifices résidentiels.
- Erreurs d'estimation : la mise à l'échelle des informations observées sur un échantillon ainsi que l'utilisation de données nationales de RNCAN produisent une certaine erreur. Par exemple, ce type d'erreur a été rencontré dans le cas B où les appartements étudiés étaient plus grands que la moyenne calculée par RNCAN. Cette situation a aussi été rencontrée dans l'aire de diffusion autour de l'hôpital où les appartements étaient plus petits que la moyenne calculée pour la ville.

- Erreurs de mise à jour : les données récoltées ont été prises à des moments précis dans le temps qui remontent généralement à quelques années dans le passé. Le développement immobilier des dernières années peut avoir un impact majeur sur le nombre d'immeubles comptés. Cette erreur est particulièrement importante dans le cas des images obtenues sur l'application Googlemaps© où les années de prises des photos n'est pas précisée.
- Erreur d'interprétation des données : il s'agit de l'erreur discutée à la section 3.2.4 à propos des années de construction des bâtiments du recensement comparativement à celles du rôle d'évaluation.

En comparant à celles énumérées ci-haut, les autres sources d'erreur ont été jugées négligeables dans le cadre d'une étude de pré-faisabilité du chauffage urbain.

5.2 Analyse conjointe de la consommation des bâtiments résidentiels, commerciaux et institutionnels

Malgré le fait que les consommations pour les deux secteurs soient obtenues par des méthodes différentes, leur combinaison est une opération relativement simple. Dans un premier temps, la somme des consommations des bâtiments commerciaux et institutionnels doit être calculée pour chaque aire de diffusion. Cette opération a pour but de ramener ces données sur la même base de comparaison que pour le secteur résidentiel. La quantité de chaleur requise pour chaque aire de diffusion est ensuite obtenue en additionnant les résultats de chaque secteur. Comme l'étude du secteur commercial et institutionnel a été réalisée pour les cas de validation et A, seuls les résultats pour ces deux cas sont présentés. La figure 26 présente de très bons résultats pour le cas de validation avec des écarts variant entre -10% et 10% par rapport à la valeur de référence. L'écart plus petit observé pour le secteur commercial et institutionnel vient donc répartir les grandes variations observées dans le secteur résidentiel sur un plus grand nombre de données.

Pour le cas A, les consommations calculées pour les aires de diffusion peuvent être comparées sur la figure 27. Les trois parties de l'image permettent de constater l'impact de la combinaison des résultats des deux secteurs. Une étude des bâtiments résidentiels seulement aurait mis l'accent sur les aires de diffusion 2, 11, 13 et 14 tandis que la représentation de l'aire combinée met l'accent sur les aires 1, 2, 11 et 13. L'ajout du secteur commercial et institutionnel a permis de

situer la présence d'un centre d'achat dans l'aire 1 qui pourrait jouer un rôle essentiel dans la rentabilité du réseau de chauffage.

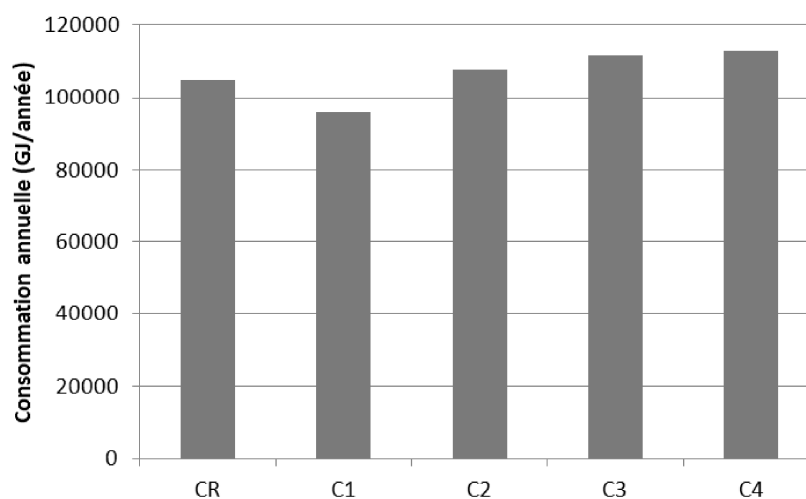


Figure 26 : Consommations de chaleur totales calculées par différentes procédures pour le cas de validation.



Figure 27 : Consommation des bâtiments pour le cas A.

5.3 Seuils de rentabilité

Avec les résultats obtenus, il est possible de porter un jugement sur la rentabilité de réseaux de chauffage urbain dans les zones proposées seulement avec le secteur résidentiel pour les cas B et C, puis en ajoutant le secteur commercial et institutionnel pour les cas de validation et A. Les densités de consommation présentées dans le tableau 23 ainsi que les figures 28 et 29 ont été

obtenues en divisant la consommation de la zone visée (ville entière ou aire de diffusion selon le cas) par l'aire de celle-ci. En comparant les valeurs obtenues aux densités du tableau 3, les cas A et B sont jugés rentables en regard des normes européennes. Tandis qu'aucun cas n'est jugé rentable, en comparant au seuil observé dans le cadre d'une étude de faisabilité au Canada. En fait, seule la demande de l'aire de diffusion 1 du cas A serait suffisamment concentrée pour assurer la rentabilité d'un réseau de chauffage urbain. Cette situation est un peu surprenante en considérant la densité élevée d'habitation dans le cas A et en considérant que le secteur étudié se situe dans le centre-ville, où la consommation de chaleur est la plus concentrée de la ville. Des calculs supplémentaires seraient justifiés pour confirmer cette position. Pour le cas C, la valeur très faible obtenue est expliquée par le fait que les aires de diffusions sont très étendues. Il serait donc intéressant de diminuer l'aire d'étude et d'analyser seulement les zones où les bâtiments sont plus concentrés.

Aucune valeur de densité linéaire n'est présentée dans ce travail puisqu'une ébauche de réseau doit être proposée préalablement, ce qui sort du cadre de cette étude. Une mise en garde doit être prononcée par rapport à l'utilisation de ces données du fait que les données de consommation ont été établies en considérant que tous les immeubles adhèreraient au réseau de chauffage urbain, ce qui n'est pas nécessairement le cas dans la réalité.

Tableau 23 : Densité de consommation pour les cas étudiés.

	Densité de conso. tot.	Densité de conso. rés.
	MWh/km ²	MWh/km ²
Validation	3970	2530
A	53500	24300
B	N/D	14 312
C	N/D	27

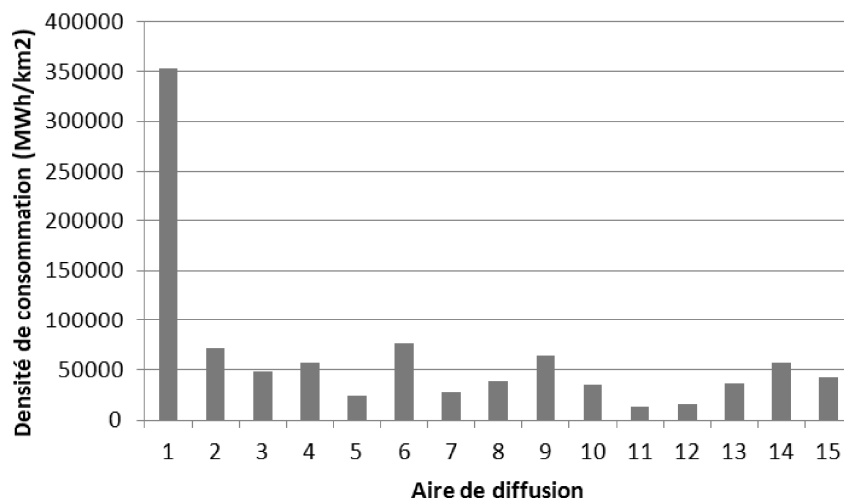


Figure 28 : Densité de consommation par aire de diffusion pour le cas A.

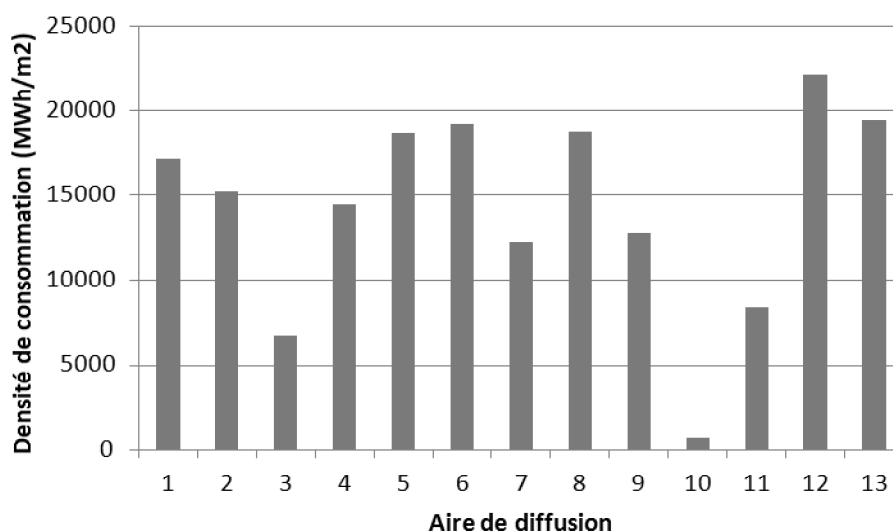


Figure 29 : Densité de consommation par aire de diffusion pour le cas B.

5.4 Retour sur les études de faisabilité

Cette section vise à répondre à un des objectifs secondaires consistant à déterminer comment les résultats obtenus peuvent être intégrés dans une étude préliminaire de faisabilité du chauffage urbain telle que schématisée à la figure 6.

Dans un premier temps, les valeurs de consommation de chaleur obtenues peuvent être utilisées directement à l'étape 2 permettant ainsi d'estimer les coûts de production de la chaleur requise par

les clients. La puissance maximale requise peut aussi être estimée en deux phases selon la méthode proposée par Alao (2007). Dans un premier temps, la consommation de chaleur est divisée, parmi les mois de chauffage selon une fonction inversement proportionnelle à la température moyenne observée durant le mois. Une approximation de la puissance pour chaque mois est ensuite obtenue en divisant la consommation calculée par le nombre d'heures de chauffage durant le mois. Les valeurs de puissance maximale et de consommation totale permettent de déterminer si la chaudière centrale suffit à couvrir les besoins thermiques.

Pour la troisième étape, un tracé du réseau est proposé en se basant principalement sur le réseau de rues. La capacité requise de la tuyauterie est déterminée à partir de la puissance calculée à l'étape 2. Ces données permettent ensuite d'estimer le coût des matériaux et de l'installation. Finalement, l'étape 1, qui consiste à évaluer les coûts de remplacement des systèmes de chauffage actuel, peut être effectuée en multipliant les coûts calculés par Alao (2007) par le nombre de bâtiments, calculé avec la nouvelle méthodologie. La combinaison des coûts permet de déterminer le prix de vente de la chaleur ainsi que la rentabilité ou non du réseau.

CHAPITRE 6 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Une méthodologie d'évaluation de la consommation de chaleur des édifices résidentiels a été développée. Celle-ci permet dans un premier temps, de simplifier la collecte de données nécessaires à propos des bâtiments, mais elle permet surtout de se libérer de la dépendance aux gouvernements locaux ou aux propriétaires pour l'acquisition des caractéristiques des immeubles en dépit d'une perte de qualité des résultats. La situation idéale est d'obtenir des données telles que celles contenues dans les rôles d'évaluation municipale pour une meilleure précision, mais l'obtention de ces données demande beaucoup de temps. La nouvelle méthodologie propose des sources de données alternatives plus facilement accessibles. Les données nécessaires à la méthodologie résidentielles ont été tirées de quatre sources soient :

- Ressources Naturelles Canada : valeurs de besoins thermiques, aires moyennes des logis.
- Statistiques Canada : années de construction, type et nombre de logis, couches du système d'informations géographique.
- Googlemaps© : aires moyennes et nombre de bâtiments.
- Google Streetview© : type de bâtiments, nombre d'étages.

6.1 Contributions

L'application de la méthodologie à un cas de validation et la comparaison des résultats à ceux obtenus par Marinova et al. (2008) et Alao (2007) dans le cadre de leurs travaux a permis de chiffrer l'erreur à plus ou moins 20% par rapport à la valeur de consommation de référence ou encore plus ou moins 5% par rapport à la valeur de la surface totale de bâtiment de référence. Fort de ces résultats, trois autres études, les cas A, B et C ont été réalisées. Celles-ci portaient sur deux villes de taille moyenne ainsi qu'un village mono-industriel ce qui a permis de confirmer la versatilité de la méthode quant au type, à la densité et à l'âge de bâtiments, soient les principaux facteurs qui influencent la demande de chaleur dans la méthode.

Une redondance a été observée parmi les sources de données ce qui a permis d'établir quatre calculs pour d'obtenir la consommation totale : C1, C2, C3 et C4. L'analyse des résultats a permis, dans un premier temps, de déterminer que les calculs C3 et C4 donnent approximativement les mêmes résultats. Puisque ces calculs tirent leurs données exactement des

mêmes sources, différant seulement lors de l'application de ceux-ci, le calcul C4 a été priorisé étant donné qu'il est plus facile. Trois résultats de consommation différents sont donc obtenus pour les bâtiments résidentiels. Une moyenne des trois résultats permet d'obtenir une bonne idée de la consommation de chaleur. Lorsqu'une quantité insuffisante de données sont disponibles, comme dans le cas C, un seul calcul peut être réalisé.

La principale faiblesse rencontrée avec cette méthode se rapporte au manque de flexibilité quant à la zone d'étude. La plus petite division pour laquelle les données sont disponibles est l'aire de diffusion, une zone géographique délimitée par Statistiques Canada dans un voisinage donné et qui compte environ 400 à 700 habitants. Dans les petites municipalités, ces zones couvrent généralement de trop grands territoires pour l'établissement de seuils valables. La solution à ce problème pourrait être trouvée dans la désagrégation d'information en utilisant les codes postaux.

Dans un deuxième temps, une méthode permettant l'évaluation de la demande de chaleur des bâtiments commerciaux et institutionnels a aussi été mise au point. La collecte de données a été simplifiée mais l'objectif de généralisation n'a cependant pas été atteint puisqu'aucune source de données universelle fournissant rapidement les données nécessaire à l'application de la méthodologie n'a été trouvée. Le secteur commercial a donc été traité au cas par cas, ce qui demande un peu plus de temps mais permet d'obtenir de meilleurs résultats. De fait, lors de la combinaison des consommations pour le cas de validation, les écarts obtenus par rapport à la valeur de référence sont passés de -10 à 17% pour le secteur résidentiel seulement, à -10% à 10% avec la combinaison du secteur commercial et institutionnel.

La vente de vapeur aux entreprises n'a pas été discutée dans ce rapport, mais celle-ci améliorerait grandement la rentabilité de réseaux de chauffage urbain. Cette avenue peut être intéressante dans le cas des usines papetières qui sont généralement situées près de scierie. L'usine dans le cas de validation présente ce type de configuration. D'autre part, plusieurs recherches sont présentement en cours, principalement dans les pays du nord de l'Europe, où le chauffage urbain des zones à haute densité a atteint une certaine saturation, pour trouver d'autres solutions techniques qui permettraient d'améliorer la rentabilité.

La nouvelle méthodologie a été développée dans le cadre d'étude de faisabilité du chauffage urbain. L'idée est donc de tirer profit de ressources locales pour obtenir une énergie plus économique et écologique. C'est pourquoi, nous proposons l'utilisation de la chaleur résiduelle

des usines papetières. Cependant, ce principe pourrait être repris dans d'autres circonstances, par exemple, cette méthode pourrait être utilisée pour calculer la grandeur des champs géothermal nécessaire pour accommoder des groupes de bâtiments.

6.2 Choix d'une méthode d'évaluation de la demande de chaleur

La section 2.2 de ce mémoire a recensé diverses méthodes d'évaluation de la demande de chaleur. Parmi celles-ci, la méthode utilisant les valeurs des besoins thermiques des bâtiments fournies par les gouvernements a été retenue. Les raisons qui ont promu son utilisation sont la facilité et la rapidité de mise en œuvre et le fait que Alao (2007) et Marinova et al. (2008) ont utilisé cette méthode pour leur travail permettant une comparaison directe des résultats obtenus avec cette méthodologie. Ce choix a donc permis de confirmer la bonne performance de la méthodologie simplifiée avec le cas validation.

Toutefois, la grande innovation de cette méthodologie repose plutôt dans le calcul de l'aire des bâtiments. L'utilisation d'autres types d'évaluation de la demande de chaleur, particulièrement les méthodes ascendantes qui se basent sur l'aire des bâtiments, permettraient donc de personnaliser les résultats obtenus en fonction des zones étudiées. Pour ce faire, une analyse des immeubles dans les villes doit être réalisée pour déterminer les spécificités de ceux-ci. Celles-ci sont ensuite utilisées pour créer un ou plusieurs profils types de bâtiments pour lesquels la demande thermique est calculée en fonction de leur superficie. C'est cette valeur qui est extrapolée à l'échelle de la ville en se basant sur les aires calculées avec la nouvelle méthodologie. Une méthode semblable, qui, au lieu d'utiliser un ou plusieurs immeubles modèles, utilisent un échantillon d'immeuble dans la ville. Le principal inconvénient de cette proposition est qu'elle va un peu à l'encontre du but de ce travail, qui consiste à simplifier la collecte de données. Cependant, il existe peut-être des valeurs types calculées dans la littérature.

La méthode développée a simplifié et uniformisé la collecte de données pour la plupart des études de cas, mais elle reste longue à appliquer. Il a fallu un peu plus d'un mois pour deux étudiants à temps plein pour compléter l'étude de cas B pour le secteur résidentiel seulement. Les étapes requérant le plus de temps sont dans l'ordre :

- Calcul de l'aire moyenne des bâtiments à partir de la photo satellite pour C1.
- Calcul du nombre de bâtiments à partir de la photo satellite pour C1 et C2.

- Identification des bâtiments commerciaux à partir de l'application Google Streetview© pour C1 et C2.

Pour le décompte des bâtiments, il serait possible d'automatiser cette étape en utilisant la reconnaissance visuelle. Une analyse de l'image permettrait d'identifier les toits et de les compter. Le principal inconvénient de cette façon de faire est que le décompte inclurait aussi les remises qui ne sont pas chauffées.

Pour la mesure des bâtiments, la reconnaissance visuelle est plus difficile à utiliser à cause des obstacles, principalement les arbres qui empêchent la bonne distinction des toits. Dans ce cas, l'utilisation des mêmes aires moyennes que celles calculées pour les cas de validation, A, B et C permettrait de simplifier le processus de collecte de données. Cependant, le tableau 24 montre de grandes disparités entre certaines des aires moyennes. Il semblerait, qu'elles soient liées au type de ville : les immeubles sont plus grands pour une grande ville, ce qui est tout à fait logique étant donné que le nombre d'appartements est plus élevé. Cependant, les données en main ne permettent pas de tirer de conclusions.

Tableau 24 : Aires moyennes pour les différents cas.

	Bâtiments. (C1 et C2)	Logis (C3 et C4)
	m ²	m ²
Validation	111	113
A	244	98
B	240	146
C	N/A	123

Concernant l'identification des bâtiments commerciaux et institutionnels, étant donné les grandes variations entre les aires de diffusion, il est difficile d'établir des moyennes ou une méthode systématique. Une liste de ceux-ci reste le moyen le plus rapide pour les identifier au complet. Cependant l'utilisation de l'application Google Streetview © donne tout de même de très bons résultats dans un temps raisonnable.

6.3 Perspectives de recherche

La méthode développée ouvre les portes à de nombreuses possibilités de recherche. Par exemple, il pourrait être intéressant d'évaluer la consommation d'eau chaude sanitaire afin d'augmenter la

consommation de chaleur des bâtiments. Une méthode basée sur le nombre d'occupants par bâtiments, obtenu de Statistiques Canada, pourrait être développée. Cette consommation supplémentaire permettrait d'atteindre les seuils proposés plus facilement.

Une autre avenue prometteuse est l'automatisation de la collecte des données. À la section 6.2, une première suggestion a été portée à l'effet qu'il serait possible d'utiliser l'intelligence artificielle pour reconnaître automatiquement les toits et les mesurer. La localisation de chacun des toits ainsi que l'association d'une demande permettrait d'atteindre un niveau de précision très intéressant pour la planification des réseaux de chaleur. D'autre part, un outil de traçage automatique des réseaux de chaleur optimisant la rentabilité pourrait être développée. L'utilisation conjointe de ces deux outils permettrait d'automatiser complètement le processus d'évaluation de la faisabilité du chauffage urbain.

Une autre avenue intéressante serait l'utilisation de la méthodologie développée dans ce travail pour étude pancanadienne de la faisabilité du chauffage urbain autour des usines papetières. Sachant qu'une certaine quantité de vapeur de basse qualité est généralement disponible de ces usines à un faible coût, il ne reste qu'à prouver la rentabilité du chauffage urbain pour intéresser les investisseurs. De plus, cette étude permettrait d'attirer l'attention sur les avantages qu'offrent les réseaux de chauffage urbain. Les gouvernements seraient alors plus enclins à fournir certaines informations de l'évaluation foncière pour réaliser des études de faisabilité. Ces informations pourraient être utilisées directement avec la méthodologie proposée éliminant ainsi les erreurs occasionnées par la mesure sur les photos aériennes.

Pour le secteur commercial, les possibilités sont encore plus grandes. L'utilisation de listes de commerces et d'institutions a été proposée dans ce travail, toutefois, aucune source fiable et disponible à grande échelle n'a été trouvée. Des recherches plus approfondies permettraient peut-être d'en trouver. De plus, des corrélations pourraient être établies entre la demande de chaleur et les informations qui sont généralement contenues dans ces listes, comme le nombre d'employés et le code SCIAN. Cette méthode éviterait d'avoir à mesurer sur les photos aériennes.

BIBLIOGRAPHIE

- Ajah, A.N., Patil, A.C., Herder, P.M., & Grievink, J. (2007). Integrated conceptual design of a robust and reliable wasteheat district heating system. *Applied Thermal Engineering*[Version électronique],27, 1158-1164.
- Alao, H. (2007). *Étude de la demande énergétique pour le chauffage des édifices dans le cadre d'un projet de chauffage de district alimenté par une usine de pâte et papier*. M.Sc.A. École Polytechnique de Montréal, Québec, Canada.
- Alao, H., Taoussi, A., Trépanier, M., Beaudry, C. & Paris, J. (2007). Rural district heating supplied by a Kraft pulp mill: Preliminary feasibility study. In *93rd annual meeting of Pulp and Paper Technical Association of Canada, reprints* (p. A247-A251). Montréal, Québec, Canada: Pulp and Paper Technical Association of Canada.
- American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers. (2008). District Heating and Cooling. In *ASHRAE handbook HVAC systems and equipments* (p.11.1-11.35). Atlanta, USA : Inch-Pound Edition.
- American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers. (2001). Pipe Sizing. In *ASHRAE handbook Fundamentals*.(p. 35.1-35.20) Atlanta, USA : SI Edition.
- Anbumozhi, V. (2007) *Eco-Industrial Clusters in Urban-Rural Fringe Areas. A strategic Approach for integrated Environmental and Economic Planning*[Version électronique]. Kobe, Japan: IGES Kansai Research Centre.
- Arkay K. E. & Blais, C. 1996. *The district energy options in Canada*. Ottawa, Ontario: Natural Resources of Canada.
- Cakembergh-Mas, A., Paris, J. & Trépanier, M. (2010). Strategic simulation of the energy management in a Kraft mill[Version électronique]. *Energy Conversion and Management*, 51, 988-997.
- Canadian District Energy Association. (2008). *The New District Energy: Building Block of Sustainable Community Development*. Ontario, Toronto: Canadian Urban Institute.
- Canadian District Energy Association. (2009). *District Energy : A National Survey Report*. Ontario, Toronto: Canadian Urban Institute.

- Chaudes Aigues. (2009). *L'eau et le chauffage*. Chaudes Aigues. Consulté le 1 mai 2009, tiré de <http://www.chaudesaigues.com/pageLibre00011773.html>
- Church, K. (2007a). Is District Energy Right For Your Community? Part 1 : The Concept. *Municipal World, November 2007*[Version électronique]. Pages 31 – 33.
- Church, K. (2007b). Is District Energy Right For Your Community? Part 2 : Sizing the System. *Municipal World, December 2007*[Version électronique]. Pages 7 – 9.
- Çomakli, K., Yüksel, B., & Çomakli, O. (2004). Evaluation of energy and exergy losses in district heating network[Version électronique]. *Applied Thermal Engineering*, 24(7), 1009-1017.
- Committee on District Heating and Cooling. National Research Council. (1985). *District heating and cooling in the United States*. Washington: The National Academies Press.
- Conférence des recteurs et des principaux des universités du Québec (CREPUQ). (2006). *Données statistiques et géographiques*. Conférence des recteurs et des principaux des universités du Québec. Consulté le 22 avril 2009, tiré de <http://ivt.crepuq.qc.ca/tableauxStat.html>.
- Danish Energy Agency. (2008). *Energy Statistics 2007*. Copenhagen, Denmark: Danish Energy Agency. Consulté le 11 juin 2009, tiré de http://www.ens.dk/da-DK/Info/TalOgKort/Statistik_og_noegletal/Maanedsstatistik/Documents/energy%20statistics%202007%20uk.pdf.
- Delbès, J., & Vadrot, A. (1985). Réseaux de froid urbain. In *Génie énergétique* (Vol. b9320, pp. 1-3) Paris, France: Techniques de l'ingénieur. Consulté le 4 février 2009, tiré de Techniques de l'ingénieur.
- Department for Business Enterprise & Regulatory Reform. (2007). *Energy consumption in the United Kingdom*. London, UK : Department for Business Enterprise & Regulatory Reform. Consulté le 15 mai 2010, tiré de <http://www.decc.gov.uk/en/content/cms/statistics/publications/ecuk/ecuk.aspx>
- Energy Information Administration. (2006). *Annual energy review 2006*. DOE/EIA-0184(2006). Washington, DC: US Dept. of Energy. Consulté le 15 mai 2010, tiré de <http://www.eia.doe.gov/aer/>.

- Energy Charter Secretariat. (2005). *Cogeneration and District Heating – Best Practices for Municipalities*. Brussels, Belgium : Energy Charter Secretariat. Consulté le 2 juillet 2009, tiré de Energy Charter: <http://www.encharter.org/index.php?id=126#384>.
- Environnement Canada. (2008). *Normales et moyennes climatiques au Canada 1971-2000*. Environnement Canada. Consulté de le 15 juillet 2009, tiré de http://www.climate.weatheroffice.ec.gc.ca/climate_normals/index_f.html.
- Enwave Canada. (2007). *Enwave*. Enwave Energy Corporation. Consulté le 16 janvier 2009, tiré de <http://www.enwave.com/home.php>
- Eriksson, O., Finnveden, G., Ekvall, T. & Bjorklund, A. (2007). Life cycle assessment of fuels for district heating: A comparison of waste incineration, biomass- and natural gas combustion[Version électronique]. *Energy Policy*, 35, 1346-1362.
- Euroheat & Power. (2006) *Renewables in district heating and cooling*. Bruxelles : Euroheat & Power. Consulté le 19 février 2009, tiré de [http://www.euroheat.org/documents/RenewablesBrochure\(web\).pdf](http://www.euroheat.org/documents/RenewablesBrochure(web).pdf).
- Forsaeus Nilsson, S., Reidhav, C., Lygnerud, K., Werner, S. (2008). Sparse district-heating in Sweden[Version électronique]. *Applied Energy*, 85, 555-564.
- Fröling, M. (2004). Environmental limitations for the use of district heating when expanding distribution into areas with low heat density. *Proceedings of the 9th international symposium in district heating and cooling*. Espoo, Finland.
- Froning, S. (2003). *DHC/CHP/RES a smile for the environment*. Euroheat & Power. Consulté le 3 juillet 2009, tiré de <http://www.euroheat.org/documents/030520.Kiev.ppt>.
- Gagnon, L. (2005). *Comparaison des options énergétiques – Émissions atmosphériques des options de chauffage*. Montréal,, Québec, Canada : Hydro-Québec – Direction Environnement.
- Gaz Métro. (2009). *Prix de fourniture de gaz naturel et de gaz de compression*. Gaz Métro. Consulté le 13 juillet 2009, tiré de <http://www.gazmetro.com/Popup/Prix-gaz.aspx>.
- Gebremedhin, A. (2003). The role of paper mill in merged district heating system[Version électronique]. *Applied Thermal Engineering*, 23, 769-778.

- Gervais, M.-A. (2007). *Étude de faisabilité portant sur l'implantation d'un réseau de chauffage de district alimenté par une usine papetière*. (M.Sc.A.). Consulté le 2 juin 2009, tiré de Proquest Dissertations and Theses.(UMI No. AAT MR36141).
- Gervais, M.-A., Kaji, S., Schweigler, C., & Paris, J. (2007). Conception et paramètres opératoires d'un réseau de chauffage de district. *VIII^{ième} Colloque Interuniversitaire Franco-Québécois (CIFQ), Montréal*, p. 257-262.
- Google (2010). *Google Maps*©. Google. Consulté le 2 février 2010, tiré de <http://maps.google.ca/>.
- Haixiong, Z. (2004). *Design of a Biomass Based District Heating System for a Community Center* (Master of Engineering). Consulté le 18 février 2009, tiré de Proquest Dissertations and Theses. (UMI No. AAT MQ89169).
- Hydro-Québec. (2006). *Profil de la demande énergétique pour le chauffage des résidences au Québec*. Communication privée. Shawinigan, Québec, Canada: IREQ.
- Hydro-Québec. (2009). *Hydro-Québec*. Hydro-Québec. Consulté le 13 juillet 2009, tiré de <http://www.hydroquebec.com/fr/index.html>.
- Industrie Canada. (2010) *Statistiques relatives à l'industrie canadienne – emploi*. Ottawa, Ontario: Industrie Canada. Consulté le 7 janvier 2010, tiré de <http://www.ic.gc.ca/cis-sic/cis-sic.nsf/IDF/cis-sic3221empf.html>.
- International District Energy Association. (2005). *US District Energy Systems*. Consulté le 4 février 2010, tiré de <http://www.districtenergy.org/us-district-energy-systems>
- Skagestad, B., & Mildenstein, P. (1999). *District Heating and Cooling Connection Handbook*. Paris, France: International Energy Agency, IEA District Heating and Cooling.
- James F. Maclaren Limited, City Departments and Toronto Hydro. (1973). *Technical Report of the Steering Committee on the City of Toronto District Heating Study – Volume2 – Support Studies*. Toronto: James F. Maclaren Limited.
- Jönsson, J., Svensson, I., Berntsson, T., & Moshfegh, B. (2008). Excess heat from kraft pulp mills: Trade-offs between internal and external use in the case of Sweden-Part 2: Results for future energy market scenarios [Version électronique]. *Energy Policy*, 36, 4186-4197.

- Karlsson, M., & Wolf, A. (2007). Using an optimization model to evaluate the economic benefits of industrial symbiosis in the forest industry[Version électronique]. *Journal of Cleaner Production*, 16, 1536- 1544.
- Karlsson, T. (1982) *Geothermal district heating the Iceland Experience*. Iceland:UNU Geothermal Training Programme. Report 1982-4.
- Klugman, S., Karlsson, M., & Moshfegh, B. (2006). An integrated chemical pulp and paper mill: Energy audit and perspectives on regional cooperation. In *Proceedings of ECOS 2006: 19th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems* (pp. 637-644). Athens, Greece: National Tehcnical University of Athens.
- Lygnerud, K. & Peltola-Ojala, P. (2010). Factors impacting district heating companies' decision to provide small house customers with heat[Version électronique]. *Applied Energy*, 87, 185-190.
- MacGregor, W.A., Hamdullahpur, F., Ugrusul, V.I. (1993). Space heating using small-scale fluidized beds: a technoeconomic evaluation[Version électronique]. *International Journal of Energy research*. 17(6). 445-466.
- Mackenzie-Kennedy, C. (1979). *District Heating – Thermal Generation and Distribution*. Toronto, Ontario, Canada: Pergamon Press.
- Marinova, M., Beaudry, C., Taoussi, A., Trépanier, M., & Paris, J. (2008). Economic assessment of rural district heating by bio-steam supplied by a paper mill in Canada[Version électronique]. *Bulletin of Science, Technology & Society*, 28(2), 159-173.
- McCallum, B. (1997). *Small-Scale Automated Biomass Energy Heating Systems: A Viable Option For Remote Canadian Communities?*Sault Ste Marie, Ontario: Ressources naturelles Canada - Service canadien des forêts / Ministère des Richesses naturelles de l'Ontario.
- McQuiston, F.C., Parker, J. D., Spitler, J. D. (2005). *Heating, ventilating, and air conditioning : analysis and design*. Hoboken, New Jersey, USA: Wiley.

- Narjot, R. (2005). Réseaux de chaleur. In *Techniques de l'ingénieur* (Vol. B2172, pp. 1-25) Paris: Éditions Techniques de l'ingénieur. Consulté le 6 avril 2009, tiré de Techniques de l'ingénieur.
- National Bureau of Statistics of China. (2005). *China statistical yearbook 2005*. China Statistics Press.
- Neill and Gunter (Nova Scotia) Limited. (1999). *Opportunities for Increased Cogeneration in the Pulp and Paper Industry*. (Rapport d'options 1999). Government of Canada. Ottawa, Ontario: Department of Natural Resources – Canadian Forest Service.
- Nijjar, J. S., Fung, A. S., Hughes, L. & Taherian H. (2009). District heating system design for rural nova scotian communities using building simulation and energy usage databases. *Transaction Canadian Society of Mechanical Engineers*, 33(1), 51-63.
- Oujé-Bougoumou. (2009). *Notre histoire*. Consulté le 1 mai 2009, tiré de <http://www.ouje.ca/content/index-fr.php>
- Pierce, M. A. (2009). *Largest district heating systems*. Consulté le 30 avril 2009, tiré de <http://www.energy.rochester.edu/dh/largest.htm>
- Polycity (2006). *Sustainable Energy Systems. Report on Energy Efficient and Renewable Energy Systems Planning and Recommendations for their Successful Application*. (TREN/05FP6EN/S07.43964/513481). Stuttgart, Allemagne : Polycity. Consulté le 9 juin 2009, tiré de <http://six6.region-stuttgart.de/sixcms/media.php/773/Report-on-Energ-Efficient.pdf>.
- Poredos, A., Kitanovski, A. (2002). Exergy loss as a basis for the price of thermal energy [Version électronique]. *Energy Conversion & Management*, 43, 2163-2173.
- Pulp & Paper Canada. (2009). *Pulp, Paper and Board mills of Canada 2009*. Pointe-Claire, Québec: Pulp & Paper Canada.
- Rafferty, K. (1996). Selected cost considerations for geothermal district heating in existing single-family residential areas [Version électronique]. *GHC bulletin*, août 2006, 10-15.
- Raoult, M. (2008). *Histoire du chauffage urbain*. Paris, France: L'Harmattan.

- Régie de l'énergie de Québec. (2009). *Statistiques utiles*. Gouvernement du Québec. Québec : Gouvernement du Québec. Consulté de le 13 juillet 2009, tiré de http://www.regie-energie.qc.ca/energie/petrole_popup.html.
- Reidhavan, C., & Werner, S. (2008). Profitability of sparse district heating [Version électronique]. *Applied Energy*, 85(9), 867-877.
- Ressources Naturelles Canada. (2009a). *Production de chaleur - Système à biomasse - Plusieurs bâtiments / Canada (Chibougamau-Chapais)* Ressources Naturelles Canada. Consulté le 7 juin 2009, tiré de http://www.retscreen.net/fr/case_studies_multiple_buildings_canada_chibougamau_chapais.php.
- Ressources Naturelles Canada (2009b). *Consommation d'énergie au Canada : accueil*. Ressources naturelles Canada. Consulté le 1 juillet 2009, tiré de <http://oee.nrcan.gc.ca/organisme/statistiques/bnce/apd/accueil.cfm?attr=0>.
- RETScreen International. (2005). *Logiciel RETScreen® – Manuel de l'utilisateur en ligne. Modèle pour projets de cogénération*. Varennes, Québec : Ressources naturelles Canada. Consulté le 14 mai 2009, tiré de http://www.retscreen.net/links/cogeneration3_manuel_utilisateur.html.
- Shipley, D., Todescos, G., Adelaar, M. (2002) Modelling a nation of buildings: estimating energy efficiency potential for large building samples. In *IBPSA Canada, eSim conference*. Montreal, Québec, Canada.
- Société canadienne d'hypothèque et de logement (SCHL). (2008). *Le guide du chauffage au bois résidentiel* (66068). Canada : Société canadienne d'hypothèque et de logement. Consulté le 13 juillet 2009, tiré de <http://www.ec.gc.ca/cleanair-airpur/default.asp?lang=Fr&n=DC7C0342-1>.
- Statistics Canada. (2009). *Report on Energy Supply-Demand in Canada, 1990-2007, Ottawa, 1990-2007*. Ottawa, Ontario: Statistics Canada.
- Statistics Canada. (2010). *Dissemination area (DA)*. Consulté le 9 juin 2010, tiré de <http://www12.statcan.ca/census-recensement/2006/ref/dict/geo021-eng.cfm>

- Svensson, I., Jönsson, J., Berntsson, T., & Moshfegh, B. (2008). Excess heat from kraft pulp mills: Trade-offs between internal and external use in the case of Sweden-Part 1: Methodology [Version électronique]. *Energy Policy*, 36, 4178- 4185.
- Swan, L.G. & Ugursal, V.I. (2009). Modeling of end-use energy consumption in the residential sector: A review of modeling techniques[Version électronique]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13. 1819-1835.
- The Kalundborg Centre for Industrial Symbiosis. (2010). *Industrial Sybiosis Sharing of Resources*. Consulté le 9 juin 2010, tiré de <http://en.symbiosis.dk/>.
- Torekov, M. S., Bahnsen, N., & Qvale, B. (2007). The relative competitive positions of the alternative means for domestic heating [Version électronique]. *Energy*, 32(5), 627-633.
- Tromborg, E., Folsland Bolkesjo, T., & Solberg, B. (2007). Impacts of policy means for increases use of forest-based bioenergy in Norway–A spatial partial equilibrium analysis [Version électronique]. *Energy Policy*, 35, 5980-5990.
- Vallios, I., Tsoutsos, T., & Papadakis, G. (2009). Design of biomass district heating systems [Version électronique]. *Biomass and Bioenergy*, 33, 659-678.
- Weigel, D., & Guibourt, J. (1988). *Éléments de calcul d'une installation de chauffage* (11^e édition entièrement refondue). Paris, France: Eyrolles.
- Werner, S. (2006). *Possibilities with more district heating in Europe* (Ecoheatcool Work package 4). Bruxelles : Ecoheatcool and Euroheat & Power. Consulté le 14 mars 2009, tiré de http://www.euroheat.org/Files/Filer/ecohatcool/project_4.htm.
- Yildirim, N., Toksoy, M., & Gokcen, G. (2006). District heating system design for a university campus [Version électronique]. *Energy and Buildings*, 38(9), 1111-1119.
- Zinko, H., Bøhm, B., Sipilä, K., Kristjansson, H., Ottosson, U., & Rämä, M. (2008). District Heating Distribution in Areas with Low Heat Demand Density. *The 11th International Symposium on District Heating and Cooling*. Reykjavik, Islande : University of Iceland. Consulté le 4 février 2009, tiré de http://www.dhc2008.hi.is/session/greinar/p55_Zinko.pdf.

ANNEXE 1 – Valeurs des besoins thermiques des bâtiments résidentiels

Tableau 25 : Valeurs des besoins thermiques de chauffage pour les cas de validation et A.

	Besoins thermiques bruts des <u>maisons unifamiliales</u> (GJ/m ²)	Besoins thermiques bruts des <u>maisons individuelles attenantes</u> (GJ/m ²)	Besoins thermiques bruts des <u>appartements</u> (GJ/m ²)	Besoins thermiques bruts des <u>maisons mobiles</u> (GJ/m ²)
Avant 1946	0,9090	0,8181	0,6363	1,2726
1946–1960	0,7740	0,6966	0,5418	1,0835
1961–1977	0,6559	0,5903	0,4591	0,9182
1978–1983	0,5575	0,5017	0,3902	0,7805
1984–1995	0,4739	0,4265	0,3317	0,6634
1996–2000	0,4028	0,3625	0,2819	0,5639
2001–2005	0,3907	0,3516	0,2735	0,5470
2006–2007	0,3516	0,3165	0,2461	0,4923

Tableau 26 : Valeurs des besoins thermiques par ménage pour les cas de validation et A.

	Besoins thermiques bruts des <u>maisons unifamiliales</u> (GJ/ménage)	Besoins thermiques bruts des <u>maisons individuelles attenantes</u> (GJ/ménage)	Besoins thermiques bruts des <u>appartements</u> (GJ/ménage)	Besoins thermiques bruts des <u>maisons mobiles</u> (GJ/ménage)
Avant 1946	118,3125	108,9348	63,1231	114,2645
1946–1960	94,0684	64,0948	41,2001	85,5651
1961–1977	78,2102	59,9866	30,3222	80,0710
1978–1983	69,5203	52,3779	35,0612	67,1589
1984–1995	64,2432	47,4550	35,9309	70,3553
1996–2000	52,7253	43,2078	24,5775	48,8296
2001–2005	57,0955	52,3283	23,8402	62,1989
2006–2007	51,3859	47,0954	21,4562	55,9790

Tableau 27 : Valeurs des besoins thermiques par surface de chauffage pour le cas B.

	Besoins thermiques bruts des <u>maisons unifamiliales</u> (GJ/m ²)	Besoins thermiques bruts des <u>maisons individuelles attenantes</u> (GJ/m ²)	Besoins thermiques bruts des <u>appartements</u> (GJ/m ²)	Besoins thermiques bruts des <u>maisons mobiles</u> (GJ/m ²)
Avant 1946	0,5686	0,5117	0,3980	0,7960
1946–1960	0,5117	0,4605	0,3582	0,7164
1961–1977	0,4333	0,3899	0,3033	0,6066
1978–1983	0,3683	0,3315	0,2578	0,5156
1984–1995	0,3130	0,2817	0,2191	0,4383
1996–2000	0,2661	0,2395	0,1863	0,3725
2001–2005	0,2581	0,2323	0,1807	0,3613
2006–2007	0,2323	0,2091	0,1626	0,3252

Tableau 28 : Valeurs des besoins thermiques par ménage pour le cas B.

	Besoins thermiques bruts des <u>maisons unifamiliales</u> (GJ/ménage)	Besoins thermiques bruts des <u>maisons individuelles attenantes</u> (GJ/ménage)	Besoins thermiques bruts des <u>appartements</u> (GJ/ménage)	Besoins thermiques bruts des <u>maisons mobiles</u> (GJ/ménage)
Avant 1946	82,4270	61,2975	30,6736	71,4689
1946–1960	79,7567	49,7666	29,0444	43,6515
1961–1977	69,1927	47,1705	20,7705	62,2510
1978–1983	65,4903	43,3120	23,8217	40,9449
1984–1995	62,3317	37,1964	20,4765	36,0736
1996–2000	54,2059	29,9492	15,9942	44,9903
2001–2005	58,4724	35,4445	17,5382	41,0892
2006–2007	52,6252	31,9001	15,7844	36,9803

Tableau 29 : Valeurs des besoins thermiques par surface de chauffage pour le cas C.

	Besoins thermiques bruts des maisons unifamiliales (GJ/m²)	Besoins thermiques bruts des maisons individuelles attenantes (GJ/m²)	Besoins thermiques bruts des appartements (GJ/m²)	Besoins thermiques bruts des maisons mobiles (GJ/m²)
Avant 1946	0,7765	0,6989	0,5436	1,0872
1946–1960	0,6989	0,6290	0,4892	0,9784
1961–1977	0,5454	0,4908	0,3818	0,7635
1978–1983	0,4636	0,4172	0,3245	0,6490
1984–1995	0,3940	0,3546	0,2758	0,5517
1996–2000	0,3349	0,3014	0,2345	0,4689
2001–2005	0,3249	0,2924	0,2274	0,4548
2006–2007	0,2924	0,2632	0,2047	0,4094

Tableau 30 : Valeurs des besoins thermiques par ménage pour le cas C.

	Besoins thermiques bruts des maisons unifamiliales (GJ/ménage)	Besoins thermiques bruts des maisons individuelles attenantes (GJ/ménage)	Besoins thermiques bruts des appartements (GJ/ménage)	Besoins thermiques bruts des maisons mobiles (GJ/ménage)
Avant 1946	111,0935	95,3289	34,3357	97,6127
1946–1960	94,3847	79,3318	28,6855	59,6194
1961–1977	72,3710	64,0987	27,9199	66,1263
1978–1983	62,9033	38,1352	15,7939	50,6479
1984–1995	55,1637	43,4909	15,5239	41,3423
1996–2000	43,3948	38,0410	34,4593	36,5931
2001–2005	49,4968	36,8998	33,4255	44,4121
2006–2007	44,5471	33,2098	30,0830	39,9708

ANNEXE 2 – Valeurs des besoins thermiques des bâtiments commerciaux et institutionnels

Tableau 31 : Valeur des besoins thermiques pour les bâtiments commerciaux et institutionnels

Type d'activités pratiquées	Dem. thermique (GJ/m ²)
Arts, spectacles et loisirs	0,914
Autres services	0,693
Bureaux	0,624
Commerce de détail	0,734
Commerce de gros	0,700
Hébergement et services de restauration	1,170
Industrie de l'information et industrie culturelle	1,083
Services d'enseignement	0,780
Soins de santé et assistance sociale	1,165
Transport et entreposage	0,781